INVESTIGACION y CIENCIA

POBREZA Y DESARROLLO INTELECTUAL

CATACLISMOS GALACTICOS

CURACION DE LAS ULCERAS CON ANTIBIOTICOS

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



SISTEMAS PARA LA DETERMINACION DEL LUGAR

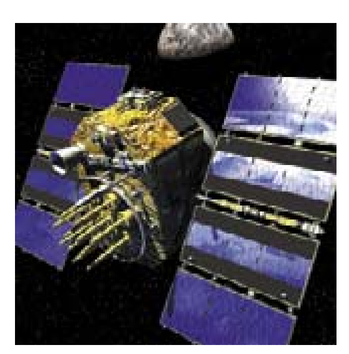
ABRIL 1996
800 PTAS.



Abril de 1996 Número 235

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

S E C C I O N E S



Portada: Slim Films

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	Steven Lehman, *SABA*
6-7	Margarita de Martínez, *INCAP* (*fotografías*); Dimitry Schidlovsky (*gráficas*)
8	Rodica Prato (*dibujo*); Lisa Burnett (*tabla*)
9	Dimitry Schidlovsky
13	Alfred T. Kamajian
14	Jared Schneidman Design
15	Carey Ballard (*arriba*); Alfred T. Kamajian (*abajo*)
16	Jared Schneidman Design (*arriba*); Louis Psihoyos, *Matrix* (*abajo*)
17	Jared Schneidman Design
18	Thomas A. Herring
21	Scott Henderson y David Spector, *Cold Spring Harbor Laboratory* (*arriba*); Tomo Narashima (*abajo*)
22-23	Seward Hung (*recuadro*) Tomo Narashima (*superior derecha*)
24	Jana Brenning
25	Judith Campisi, *Lawrence Berkeley Laboratory*
41	Barry Ross
42	Michael J. Buckingham (*arriba*); M. J. Buckingham *et al.* (*abajo*)
43	Barry Ross
44	John R. Potter
46	Servicio de Información de EE.UU. (*arriba*); Observatorios Hale (*abajo*)
47-48	Cortesía de Gerald Cecil
49	Cortesía de Gerald Cecil; Anatoly A. Suchkov *et al.*
50-51	Alfred T. Kamajian
54-55	Roberto Osti
56	Dimitry Schidlovsky
57	Cortesía de Arthur J. Morris, Gordon I. Nicholson y Martin J. Blaser
58	Dimitry Schidlovsky
59	Roberto Osti (*dibujos*); Lisa Burnett
60-66	Rosendo Pascual
68-70	Michael Goodman
72	Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM (*fotografía*); Michael Goodman (*dibujo*)
73	Lisa Burnett
80-83	Documents PLS
84	Michael Goodman
87	Johnny Johnson

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

J. M. García de la Mora: *Desnutrición, pobreza y desarrollo intelectual*; Santiago Torres: *Telómeros, telomerasa y cáncer*; Manuel Puigcerver: *Visión submarina y ruido de fondo*; Mónica E. Murphy: *Explosiones galácticas*; Esteban Santiago: *Origen bacteriano de la úlcera de estómago*; Luis Bou: *Quarks por ordenador, Creaciones informáticas, Juegos matemáticos* y *Ensayo*; J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*; Angel Garcimartín: *Perfiles*;

Ciencia y sociedad: Juan Pedro Campos

Ciencia y empresa: Manuel Puigcerver y Ana María Rubio

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Associate Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam; Glenn Zorpette
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	9.700	17.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 – 08907 L'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «El Túnel Aerodinámico de Altitud del nuevo Laboratorio de Motores de Aviación de Cleveland, dirigido por el Comité Asesor Nacional para la Aeronáutica, posiblemente sea único en su clase en el mundo. En él, se sustituyen las pruebas en vuelo por la acción de unas instalaciones completas de propulsión aeronáutica bajo unas condiciones precisas de temperatura, humedad y presión, las que se encontrarían a 9000 metros de altitud. Cuando se alcancen los 50.000 caballos disponibles en el túnel podrán conseguirse velocidades aerodinámicas de hasta 900 kilómetros por hora.»

«En tiempos de paz, la radiogoniometría en alta frecuencia capta cualquier radioseñal de voz o en código que se transmita por canales de onda corta, y en cosa de una fracción de segundo muestra en la pantalla de un tubo de rayos catódicos la dirección de donde llegan las señales. Actualmente constituye una parte vital del sistema de rescate mar-aire de la Guardia Costera de los Estados Unidos.»

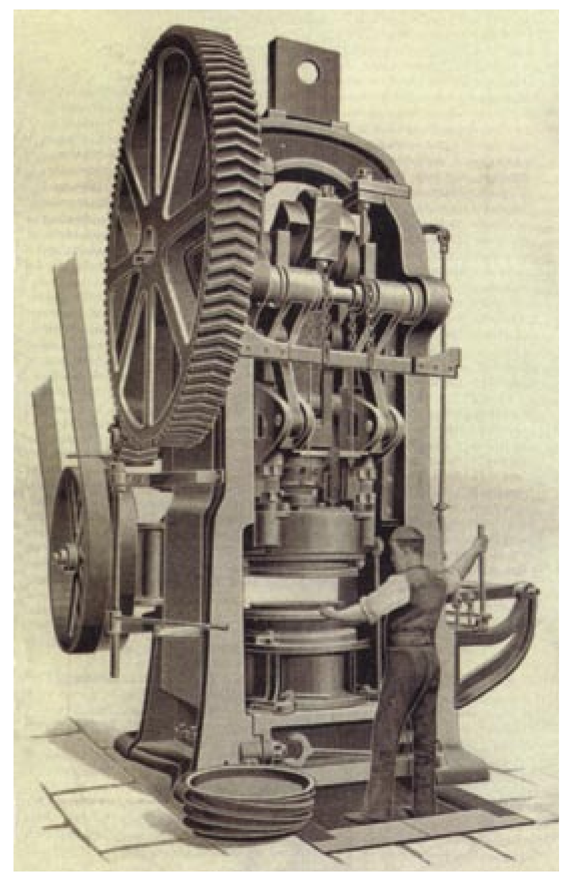
...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «La DCCLXXVI Olimpíada comenzó el seis de abril. Por primera vez desde su abolición hace quince siglos, han revivido aquellos famosos juegos; juegos, no obstante, en los que se patentiza nuestro moderno espíritu cosmopolita, porque las listas están abiertas a todos los atletas del planeta. Los juegos no se celebraron en la antigua Olimpia, una pequeña llanura de Elis, sino en el estadio de Atenas.»

«Thomas Alva Edison ha logrado un nuevo invento consistente en un sencillo aparato que permite observar directamente los huesos de las extremidades, sin intermedio de la fotografía. No es posible sobreestimar la importancia del ‘fluoroscopio’ para los cirujanos, a quienes facilitará un diagnóstico instantáneo de cada caso. El método fotográfico requiere una exposición larga, ya de por sí nociva, seguida del lento revelado y secado de la placa y, peor aún, la incertidumbre de llegar a un resultado en cualquier caso.»

«La central eléctrica de las Cataratas del Niágara constituye una nueva atracción. Pero el visitante despreocupado se perderá lo mejor de la obra. Fuera de su vista y debajo del suelo macizo, directamente bajo las dínamos, hay un gran foso rectangular que desciende casi sesenta metros atravesando roca maciza. Cerca del fondo, la compañía eléctrica ha instalado unas enormes ruedas hidráulicas de turbina, desde cada una de las cuales se eleva un árbol vertical hasta la superficie para accionar directamente los rotores de los alternadores de 5000 hp. La central se presenta ahora como suministradora de energía eléctrica, cuando originalmente se la destinaba a vender energía hidráulica.»

«Uno de los ejemplos más recientes del ingenio de los modernos fabricantes de bicicletas es la producción de una llanta sin juntura para ruedas. Una placa metálica circular, producto de un horno Siemens, se lleva a una gran prensa mecánica, que se ilustra. Estas prensas, que pesan del orden de 35 toneladas, se han diseñado especialmente para este trabajo y las suministran Taylor & Challen, de Birmingham (Inglaterra).»



Prensa mecánica para hacer llantas de acero de bicicleta

...ciento cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «El profesor Faraday descubrió, el pasado enero o febrero, un nuevo principio magnético que él llama ‘diamagnetismo’, porque los cuerpos en los que ejerce su efecto o que lo contienen (bismuto, fósforo, agua, etc.) se colocan a sí mismos en ángulo recto con aquellos que contienen el principio magnético (hierro, níquel, etc.). Una curiosa propiedad de los cuerpos diamagnéticos es que no poseen polaridad.»

«Una mejora en el arte de la gliptografía (transferir grabados, etc., a placas de cinc) ha reclamado recientemente la atención del rey de Prusia y de sus ministros. Cierto berlinés ha descubierto un método para producir, del modo más perfecto, fácil y rápido, facsímiles de documentos, escritos de toda índole y billetes de banco. Uno de los funcionarios del gobierno ofreció al inventor un viejo documento para copiar, documento que por su antigüedad y estado de desgaste parecía imposible de imitar. El artista se lo llevó a su *taller* y en pocos minutos retornó con cincuenta copias del mismo. La imitación era tan perfecta, que llenó al monarca y a sus consejeros de un asombro que rozaba la estupefacción e incluso el temor. El gobierno está negociando con el inventor la compra de su secreto.»

Desnutrición, pobreza y desarrollo intelectual

La investigación revela facetas ocultas de la influencia de la desnutrición en el desarrollo mental de los niños, que se agravan con la pobreza

J. Larry Brown y Ernesto Pollitt

La extensión de la desnutrición entre la población infantil es un fenómeno que debiera inquietarnos. Hay, repartidos por todo el mundo, unos 195 millones de niños menores de cinco años que están infraalimentados. La desnutrición aparece con mayor claridad en los países subdesarrollados, donde esta calamidad llega a ser en muchos casos extrema: las imágenes de niños famélicos en naciones castigadas por la guerra o el hambre nos son trágicamente familiares. En los países adelantados abundan también formas menos graves de malnutrición. El registro de 1992 cifraba en 12 millones los niños estadounidenses que consumían dietas cuyo nivel de nutrientes estaba muy por debajo del establecido por la Academia Nacional de Ciencias.

La infraalimentación desencadena toda una batería de problemas pediátricos, muchos de los cuales devienen crónicos. Causa gravísimas pérdidas de peso, retarda el desarrollo, debilita la resistencia a las infecciones y, en los peores casos, produce la muerte prematura. Sus efectos pueden ser devastadores, sobre todo en los primeros años de la vida, cuando por estar el cuerpo en rápido crecimiento necesita mayor cantidad de calorías y nutrientes.

La subnutrición puede también alterar los procesos cognitivos. Tiempo atrás creíase que, si la infraalimentación durante la infancia impedía el normal desarrollo de la mente, era sólo porque inducía daños estructurales permanentes en el cerebro. Pero más recientes investigaciones apuntan a que la desnutrición puede también deteriorar la inteligencia por otras vías. Se ha comprobado, además, que, aun cuando la estructura cerebral esté resentida, parte del daño puede ser reversible. Estos nuevos descubrimientos tienen importantes consecuencias para las políticas educacionales orientadas a fomentar el éxito escolar entre los niños desvalidos.

Aunque los primeros escarceos sobre la vinculación de la infraalimentación con la función cerebral se remontan a comienzos de este siglo, transcurrieron varias décadas hasta que la cuestión atrajera la atención. Por los años sesenta, el evidente auge de la desnutrición infantil en los países industrializados, junto con una continua preocupación por la grave desnutrición que se daba en los países subdesarrollados, movieron a los científicos a estudiar los efectos persistentes de la infraalimentación. Estudios hechos en Iberoamérica, en Africa y en los EE.UU. patentizaron que, en las pruebas de inteligencia, los niños que presentaban un historial de desnutrición obtenían resultados inferiores a los de los niños que, siendo de similar condición socioeconómica, estaban bien nutridos. Aquellos estudios, por diversas limitaciones experimentales, no fueron del todo convincentes, pero la investigación posterior ha establecido con firmeza que la falta de una alimentación adecuada en los primeros años de la vida puede limitar, a la larga, el desarrollo intelectual.

Durante muchos años, se admitió que había una conexión directa entre nutrición y desarrollo intelectual. Preocupaba sobre todo la deficiencia nutricional que ocurría desde la concepción hasta la edad de dos años, período en que el cerebro se desarrolla hasta aproximadamente el 80 por ciento de su tamaño adulto. En ese intervalo crítico, pensábase, cualquier grado de desnutrición detendría el desarrollo normal del cerebro y le infligiría por lo mismo graves y duraderos daños.

Pero poco a poco los investigadores fueron cayendo en la cuenta de que el modelo del “efecto principal”, como hemos llamado a tal suposición, era demasiado simplista. Se demostró, por ejemplo, que no estaba justificado el énfasis puesto en los dos primeros años de la vida. En ese tiempo el cerebro de los niños desnutridos no siempre ha llegado del todo al término de su desarrollo. Puede éste detenerse temporalmente y, si alrededor de los tres años de edad mejora la dieta alimenticia, es probable que el cerebro se siga desarrollando a un paso casi normal. A la inversa, puede resultar afectada la estructura cerebral aunque la desnutrición la sufra el niño después de sus dos primeros años de vida; ello pone de manifiesto la importancia de una nutrición adecuada durante toda la infancia para el desarrollo cognitivo. No es correcto, pues, ceñir la atención a los dos primeros años de vida.

Cierto es que una grave desnutrición durante la infancia puede originar mermas cognitivas irreparables, según predice el modelo del “efecto principal”. Pero este modelo no explica cabalmente el deterioro intelectual resultante de una infraalimentación menos grave. Se evidenció esa incapacidad de la teoría en los años sesenta, cuando se comprobó que niños ligeramente desnutridos

1. UN DESAYUNO ADECUADO contribuye a evitar en las escuelas de párvulos la malnutrición y los problemas que ésta trae consigo. Va ganando aceptación la idea de que, para lograr el pleno desarrollo intelectual del individuo, hay que satisfacer sus exigencias nutricionales a lo largo de toda su infancia.

pertenecientes a familias de rentas medias y altas (cuyo déficit nutricional derivaba de alguna condición clínica) no habían sufrido los mismos retrasos intelectuales que otros niños, también ligeramente desnutridos, que vivían en comunidades pobres. Si la merma intelectual obedeciese a una alteración estructural del cerebro causada por una mala o escasa nutrición, los dos grupos de niños habrían alcanzado puntuaciones parecidas. Tenía que haber en juego algo más. En otras palabras, el nivel económico, la educación y otros factores del entorno protegían manifiestamente a los niños de los perjudiciales efectos de una dieta escasa o les exacerbaban el daño de una mala alimentación.

En los años setenta, una investigación realizada por David A. Levitsky y Richard H. Barnes, de la Universidad de Cornell, contribuyó a aclarar las formas en que la desnutrición podría atentar contra el desarrollo cognitivo, distintas de la agresión cerebral directa. Levitsky y Barnes examinaron los efectos de la desnutrición en roedores. Levitsky llegó a la conclusión de que, si los animales desnutridos tenían menos éxito en pruebas de habilidad tales como la de recorrer el laberinto, ello no se debía a que sus cerebros hubiesen sufrido daño, sino, sobre todo, a que la falta de energía les impedía entrar en contacto con sus iguales y con los objetos de su entorno. Añadíase que las madres mimaban a las crías menos móviles, comportamiento que frenaba todavía su desarrollo e independencia.

De estas observaciones se dedujo, por extrapolación, que la incapacidad cognitiva de los niños desnutridos podría deberse, en parte, a su escasa interacción con otras personas y con su entorno. Tan fundamental cambio en la manera de entender el problema despertó un creciente optimismo respecto a cómo remediar en el futuro la incapacidad: si la merma de interacción social era nociva para el progreso cognitivo, el apoyo social e intelectual ayudaría a superar las carencias en las experiencias de los individuos más jóvenes.

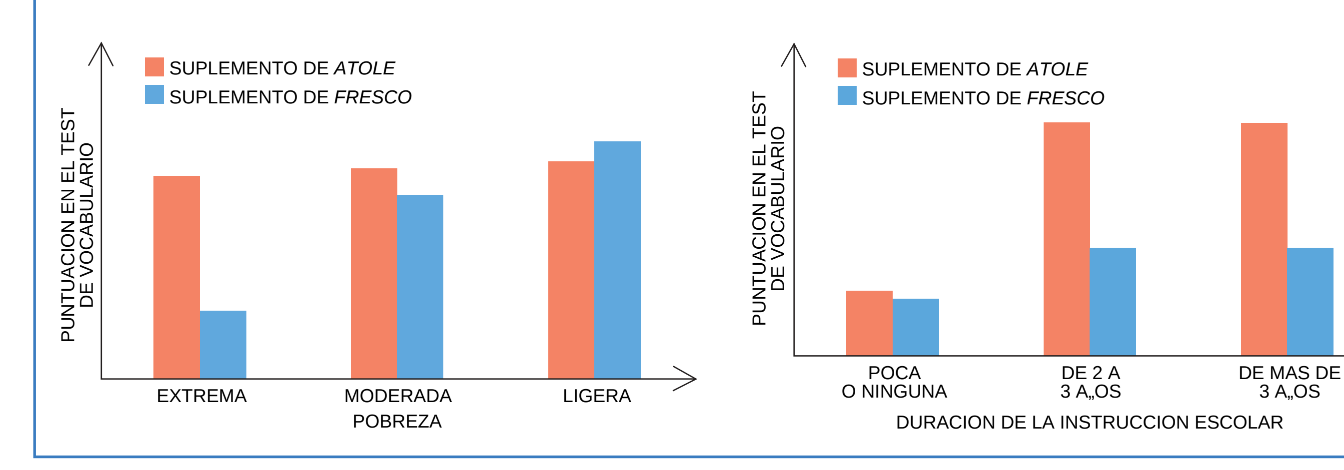
Pese a la solidez de las nuevas hipótesis, los científicos no contaban con muchos datos humanos para res-



Efectos de la pobreza y desnutrición: el proyecto Guatemala

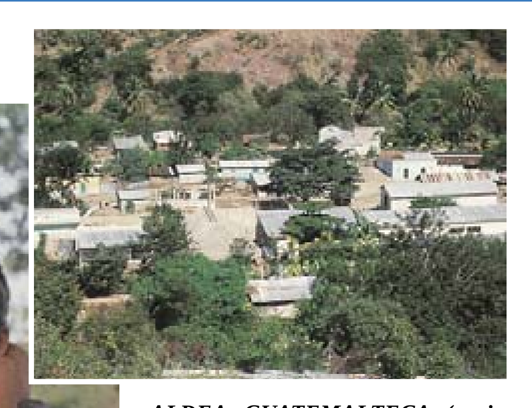
En un proyecto llevado a cabo por el Instituto de la Nutrición de Centroamérica y Panamá, se estudió a niños, adolescentes y jóvenes adultos guatemaltecos, que habían recibido en su infancia suplementos nutritivos, para establecer qué influjo tienen a la larga la dieta infantil y la pobreza en el desarrollo intelectual. A los sujetos estudiados, entre los que se contaban los niños que vemos aquí a la derecha, se les sometió a una batería de tests cognitivos. Los individuos que antes de los dos años de edad consumieron regularmente un suplemento muy nutritivo llamado *atole* alcanzaron poco más o menos el mismo nivel de puntuaciones en la mayoría de los tests, por ejemplo en los de habilidad verbal, independientemente de su condición económica (*abajo a la izquierda*). En cambio, aquellos a quienes se les suministró un suplemento menos nutritivo llamado *fresco* obtuvieron puntuaciones que variaban según el nivel de pobreza. Es evidente que una buena nutrición al comienzo de la vida puede ayudar a contrarrestar los perniciosos efectos de la pobreza en el desarrollo intelectual. Entre los individuos que tuvieron más de dos años de escolarización, quienes habían tomado *atole* lograron puntuaciones significativamente más altas que las de los que recibieron *fresco* (*abajo a la derecha*); ello nos revela que la falta de la debida nutrición durante la infancia puede menoscabar después los beneficios de la escolarización.

—*E. P.*



paldar este cambio de enfoque. Un estudio reciente, realizado por uno de nosotros (Pollitt) y varios colaboradores, viene a prestar sólido respaldo a la tesis de que si la desnutrición afecta al desarrollo intelectual es, en parte, porque compromete muchos y diferentes aspectos del desarrollo infantil. Este estudio permite también comprender mejor cómo se combinan las carencias alimentarias con la penuria económica sufrida durante la infancia para impedir el desarrollo de las funciones intelectuales en fases más avanzadas de la vida. Entre los colaboradores de Pollitt estuvieron Reynaldo Martorell, de la Universidad de Emory, Kathleen S. Gorman, de la de Vermont, Patrice L. Engle, de la Politécnica estatal de California, y Juan A. Rivera, del Instituto de la Nutrición de Centroamérica y Panamá.

El proyecto consistió en un amplio seguimiento de guatemaltecos que años antes habían sido objeto de estudio por otros investigadores. En 1969 el Instituto de la Nutrición de Centroamérica y Panamá, con la ayuda de varios organismos gubernamentales y fundaciones privadas estadounidenses, puso en marcha una tarea ingente: averiguar si los suplementos nutritivos servían para evitar los problemas pediátricos de origen carencial. Durante ocho años, los habitantes de cuatro aldeas de Guatemala recibieron uno de dos suplementos nutritivos. Conocióse por entonces que el principal nutriente del que carecían las dietas en los países subdesarrollados eran las pro-



ALDEA GUATEMALTECA* (arriba)*, una de las cuatro en que los niños y las mujeres gestantes recibieron nutrición suplementaria.



TESTS COGNITIVOS aplicados en la realización del proyecto guatemalteco. Evaluaron las habilidades de los participantes en riqueza de vocabulario, comprensión de la lectura, cultura general y aritmética.

J. LARRY BROWN y ERNESTO POLLITT han colaborado durante varios años en el estudio de la relación entre política y nutrición infantil. Brown es director del Centro de Investigaciones sobre Hambre, Pobreza y Política Nutricional de la Universidad de Tufts, en cuya facultad de medicina enseña gestión sanitaria. Pollitt es profesor de desarrollo humano en el departamento de pediatría de la facultad de medicina de la Universidad de California en Davis y miembro del Programa Internacional de Nutrición.

teínas. Por eso, los que trabajaban en el proyecto atendieron sobre todo a la respuesta de los niños ante un añadido de proteína a sus dietas. Las madres y los niños de dos aldeas recibieron un suplemento rico en proteína llamado *atole* (nombre de unas gachas de maíz guatemaltecas). Los habitantes de las otras dos aldeas, tomados como grupo de control, recibieron *fresco*, una bebida dulce y afrutada, pero sin ninguna proteína. Ambos suplementos proporcionaban vitaminas, minerales y calorías; *fresco* sólo proporcionaba un tercio de las calorías de *atole*.

Al iniciarse el estudio se invitó a participar en él a todas las mujeres embarazadas y a todos los párvulos de menos de siete años que había en las aldeas. Durante la ejecución del proyecto, se pidió la incorporación en el mismo a cuantos niños menores de siete años y mujeres gestantes llegaron a las aldeas. Así pues, de 1969 a 1977 participaron más de 2000, entre niños y madres. Los exámenes médicos por los que pasaban regularmente los niños revelaron que ambos complementos mejoraban la salud de los participantes, pero con el *atole* la mejora era mucho más llamativa. Por ejemplo, la tasa de mortalidad infantil disminuyó en las cuatro aldeas, pero en las que recibieron *atole* esta tasa bajó un 69 %, mientras que en las que recibieron *fresco* sólo bajó un 24 %. Y únicamente el *atole* incrementó las tasas del crecimiento en los niños de menos de tres años.

El estudio de seguimiento se llevó a cabo entre 1988 y 1989. El grupo de Pollitt visitó las aldeas para ver los efectos a largo plazo de aquellos suplementos nutritivos en el desarrollo intelectual. Más del 70 % de los participantes originales, cuyas edades oscilaban ahora entre 11 y 27 años, se prestaron a tomar parte en el seguimiento. El equipo concentró sus análisis en el grupo, de alrededor de 600 personas, que recibió *atole* o *fresco* tanto prenatalmente como por lo menos durante los dos años siguientes al del nacimiento. A estos adolescentes y jóvenes adultos se les sometió a tests de alfabetismo, de riqueza de vocabulario y de comprensión de la lectura, a un examen de cultura general, a una prueba de aritmética y a otra prueba estándar de inteligencia no verbal. A continuación, los investigadores determinaron la correlación entre los resultados obtenidos en las pruebas y la instrucción y la situación económica (medida ésta por calidad de vivienda, ocupación del padre y conocimientos de la madre).

Los sujetos que recibieron *atole* al comienzo de la vida sacaron en la mayoría de los tests cognitivos puntuaciones bastante más altas que las de los que recibieron *fresco*. Los efectos más eficaces del *atole* se observaron entre los individuos pertenecientes al nivel inferior de la escala socioeconómica: los niños de ese rango respondieron igual que los niños más privilegiados de sus aldeas. Por consiguiente, el *atole* venía a ser una especie de compensador social, que ayudaba a los niños de las familias más pobres a alcanzar el mismo nivel al que llegaban, dentro de cada aldea, sus compañeros de mejor situación económica. Pero todos los niños que fueron objeto de este estudio vivían en extrema pobreza y no alcanzaban el nivel al que llega, por ejemplo, el niño de cualquier familia de clase media en una zona próspera de Guatemala. De ahí que una nutrición adecuada no podría por sí sola compensar del todo los negativos efectos que sobre el desarrollo intelectual ejerce la pobreza.

Además, el *atole* parecía aumentar la ventaja en la instrucción. Con los años de escolarización se agrandaban las diferencias entre los éxitos de los adolescentes que recibieron *atole* y los de aquellos que recibieron *fresco*. Del resultado se desprendía que una nutrición escasa podía abortar algunos de los beneficios típicos de la instrucción. En otros trabajos relacionados, aunque realizados por separado —el grupo de Pollitt en el Perú y Sally Grantham-McGregor, de la Universidad de las Indias Occidentales, en Jamaica—, se demostró que la capacidad de aprender tenía que ver con el tiempo que hace que se ha comido: el desayuno diario antes de ir a la escuela es muy importante, sobre todo para los niños que están al borde de la desnutrición.

Los mejores efectos a largo plazo en el grupo del *atole* se explican, en buena medida, por las diferencias en cuanto a capacidad motora, crecimiento físico y desarrollo social y emocional de los niños. Los más jóvenes que al comienzo de la vida recibieron *fresco* sufrieron mayores penalidades físicas o inferiores tasas de crecimiento y de recuperación de infecciones, por ejemplo, que los que recibieron *atole*. Al retrasárseles el crecimiento, aquellos niños tardaron

también algo más en aprender a gatear y a andar que el promedio de los suplementados con *atole*. Pollitt y sus colegas conjeturan que a los que tomaron *fresco* esta limitación les retrasaría la adquisición de las habilidades cognitivas desarrolladas por los niños conforme van explorando su entorno físico y social.

Por otro lado, como los parvulillos infraalimentados se quedaban pequeños para su edad, tal vez los adultos tendieran a tratarlos como si fuesen realmente menores en años de lo que eran. Tal actitud retrasaría el desarrollo cognitivo, si a los pequeñuelos no se les estimulase, por ejemplo, a hablar, de igual modo que a los demás niños de su misma edad. En contraste, los niños que tomaron *atole* se libraron de la desnutrición, crecieron más deprisa y probablemente fueron capaces de responder a más estímulos de su entorno social. Claro que los resultados no excluyen la posibilidad de que los cerebros de los que recibieron *fresco* sufrieran algún grado de deterioro que entorpeciera luego su funcionamiento. Sin embargo, por los datos se puede colegir que también otros factores, tales como el entorno social del niño, desempeñaron un papel importante.

Los resultados obtenidos en Guatemala cuadran asimismo con el modo predominante de entender las interrelaciones entre alimentación escasa, pobreza y bajo nivel de instrucción. Los complementos nutritivos combaten los efectos de la pobreza, pero sólo hasta cierto punto. Aunque el niño bien alimentado sea más capaz de explorar el entorno, poco puede ofrecer a su exploración una

Cómo evitar la malnutrición

Las opiniones sobre la naturaleza de la malnutrición —y las recomendaciones para evitarla— se han venido refinando con los años. Antes se consideraba que la falta de proteínas era la carencia más inquietante en las dietas de los niños infraalimentados, especialmente de los países en vías de desarrollo. La proteína ingerida se degrada en aminoácidos; a continuación, éstos se reciclan para sintetizar las proteínas específicas que el individuo necesita en cada momento. Las proteínas forman muchos elementos estructurales del cuerpo y llevan a cabo la mayoría de los procesos celulares. Por los años setenta, los investigadores empezaron a preocuparse también por las calorías. Si el cuerpo está falto de calorías, en vez de utilizar los aminoácidos para fabricar nuevas proteínas, los degrada para procurarse energía.



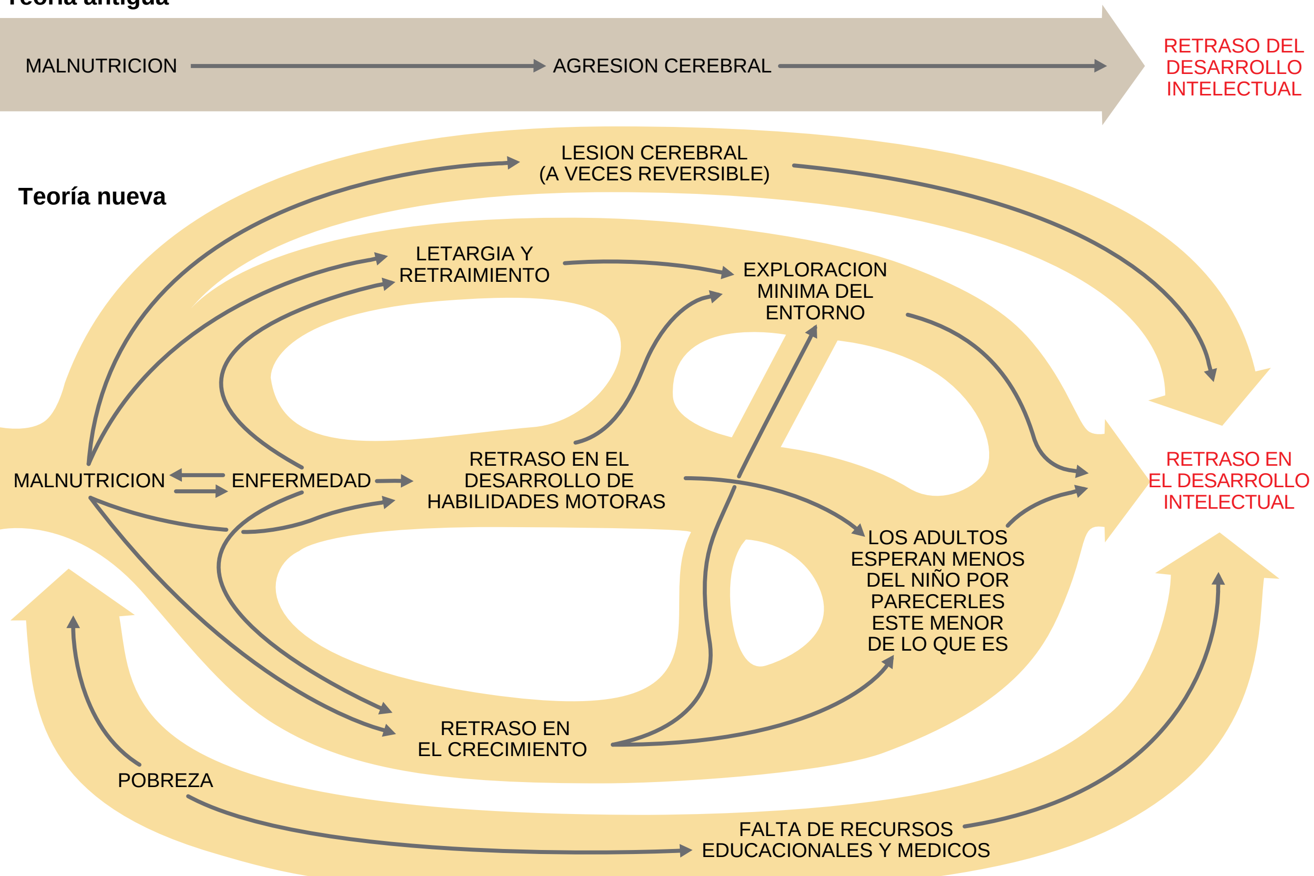
***LAS NECESIDADES DIETETICAS** infantiles pueden satisfacerse haciendo que los niños coman a diario diversas porciones de cada una de estas clases de alimentos.*

En fechas más cercanas, las investigaciones sobre nutrición han puesto de manifiesto que las deficiencias en vitaminas y minerales, en particular vitamina A, yodo y hierro, favorecen la aparición de graves problemas de salud. La vitamina A es importante para la vista, el crecimiento de los huesos, la formación y el desarrollo de los dientes y para la resistencia a las infecciones. El yodo, que tiende a escasear en los países subdesarrollados, es necesario para el buen funcionamiento del sistema nervioso central. El hierro es uno de los componentes de la hemoglobina, que transporta el oxígeno a los tejidos. El hierro ayuda también al cuerpo a combatir las infecciones; los niveles de este mineral son bajos en las dietas de muchos niños pobres de los EE.UU. De ahí que la mayoría de los investigadores piense ahora que como mejor se evita la malnutrición es con una dieta que proporcione las proteínas, calorías, vitaminas y minerales suficientes para asegurar un desarrollo normal. La tabla ofrece algunas directrices generales con miras a conseguir una nutrición óptima.

—J. L. B.

		CANTIDAD DE CADA TOMA*		
CLASE DE ALIMENTO	**TOMAS DIARIAS**	**DE 1 A 3 AÑOS DE EDAD**	**DE 4 A 6 AÑOS**	**7 A 10 AÑOS**
PAN INTEGRAL O ENRIQUECIDO, CEREALES, ARROZ, PASTA	6 O MAS	1/2 REBANADA DE PAN O 1/4 TAZA DE ARROZ O DE FIDEOS	1 REBANADA DE PAN O 1/2 TAZA DE ARROZ O DE FIDEOS	DE 1 A 2 REBANADAS DE PAN O DE 1/2 A 1 TAZA DE ARROZ O DE FIDEOS
VERDURAS	3 O MAS	DE 2 A 4 CUCHARADAS DE PURE O 1/2 TAZA DE JUGO	DE 1/4 A 1/2 TAZA DE PURE O 1/2 DE JUGO	1/2 A 3/4 DE VASO DE PULPA O 1/2 DE JUGO
FRUTA	2 O MAS	DE 2 A 4 CUCHARADAS DE PURE O 1/2 VASO DE ZUMO	DE 1/4 A 1/2 VASO DE PULPA O 1/2 DE ZUMO	1/2 A 3/4 DE VASO DE PULPA O 1/2 DE ZUMO
CARNES MAGRAS, PESCADO, AVES DE CORRAL, HUEVOS, NUECES, LEGUMBRES	2 O MAS	DE 30 A 50 GRAMOS	DE 30 A 50 GRAMOS	DE 50 A 75 GRAMOS
LECHE Y QUESO	3 O 4	1/2 A 3/4 DE VASO DE LECHE O DE 15 A 20 GR DE QUESO	3/4 DE VASO DE LECHE O 20 GR DE QUESO	DE 3/4 A 1 VASO DE LECHE O DE 20 A 30 GR DE QUESO

**Datos tomados de "Growth and Nutrient Requirements of Children." P. M. Queen y R. R. Henry en* Pediatric Nutrition, *coord. por R. J. Grand y otros. Butterworth, 1987*



2. LA INFRAALIMENTACION constituye un freno para el desarrollo de las capacidades cognitivas. Y lo hace por varias rutas interconexas, según recientes investigaciones. De acuerdo con las hipótesis de antaño, las deficiencias cognitivas procedían exclusivamente del daño infligido al cerebro (*arriba*). Ahora los expertos creen también (*abajo*) que la malnutrición altera el desarrollo intelectual al debilitar el estado de salud del niño y disminuir su nivel de energía, frenando su crecimiento y el desarrollo de su motricidad. Además, una situación económica de precariedad puede exacerbar los efectos de todos estos factores, poniendo a los niños pobres en riesgo de padecer a la larga carencias mentales.

comunidad pobre. Y aunque las escuelas proporcionen muchos de los estímulos que necesita el niño, una temprana desnutrición puede hacer inútiles todos los valores educativos. Más importante aún: este estudio demuestra que una alimentación escasa en la primera infancia puede seguir impidiendo en la edad adulta el pleno desarrollo intelectual.

Como los planificadores iniciales del estudio guatemalteco centraron su atención en las proteínas, estos resultados ponen de relieve la importancia de las mismas para el desarrollo de la inteligencia. Los suplementos contenían también calorías, vitaminas y minerales; por consiguiente, sus funciones deberían tomarse en cuenta, pero el particular enfoque de este estudio hace difícil aislar los efectos de los respectivos nutrientes.

Otros trabajos vinculan vitaminas esenciales y minerales a la capacidad mental. Así, en un estudio realizado en Java Occidental, el equipo de Pollitt ha demostrado que hay una estrecha asociación entre la anemia por falta de hierro (la consecuencia más frecuente de la desnutrición) y una merma en las habilidades motoras y mentales de los niños. Los investigadores suministraron dosis complementarias de hierro a bebés de entre 12 y 18 meses que padecían anemia ferropénica. El mineral mejoró mucho las respuestas de los pequeños a tests de habilidad mental y motora. Por desgracia, los niños que sufren anemia ferropénica son más proclives al saturnismo, el cual produce su propia serie de trastornos neurológicos e impide el desarrollo normal de los procesos cognitivos. En consecuencia, los niños pobres se enfrentan a un doble peligro: el de la mayor probabilidad de ser anémicos y el de la mayor probabilidad de vivir donde hay más incidencia de saturnismo o intoxicación con sales de plomo.

Estudios como el de Guatemala han movido a muchos especialistas, entre ellos a uno de nosotros (Brown), a sugerir que, cuando no pueda modificarse fácilmente el entorno socioeconómico de un niño, el procurarle una adecuada alimentación durante la infancia y después hará, por lo menos, que no sean en él tan graves las mermas intelectuales que genera la pobreza. Pero los suplementos nutritivos no pueden por sí solos invertir los perniciosos efectos que a largo plazo produce una infraalimentación precoz. Lo ideal sería dar otros muchos apoyos, como de asistencia social, con oportunidades para desarrollar nuevas habilidades sociales bajo la guía de un progenitor u otro adulto interesados. La investigación reciente ha demostrado que, a menudo, en comunidades económicamente pobres, los programas de intensificación de la enseñanza infantil han aliviado algunos de los problemas asociados a una anterior desnutrición.

Para que tal intervención tenga probabilidades de éxito, deberá ser global y constante. La mayoría de

los niños desnutridos están expuestos a penurias continuas que exacerban los efectos de la infraalimentación. Suelen vivir en zonas donde las escuelas son de ínfima calidad y en las que hay poca, si alguna, asistencia médica. Sus padres están con frecuencia en el paro o trabajan por sueldos muy cortos. Y ellos, los niños, quizá sufran enfermedades que les quiten la energía necesaria para el aprendizaje.

Mirándolo todo bien, parece claro que la de evitar la desnutrición de los niños pequeños sigue siendo la mejor política, no sólo desde el punto de vista moral, sino también desde el económico. Pues, por ejemplo, muchos de los miles de millones de dólares que los EE.UU. invierten en la enseñanza se desperdician cuando a la escuela primaria entran unos niños intelectualmente debilitados por la desnutrición.

El gasto inmediato en programas de nutrición y en intervenciones más amplias debería considerarse como una importantísima inversión en el futuro. La desnutrición menoscaba la disponibilidad para el aprendizaje y, después, la productividad laboral, constituyendo por tanto un riesgo inadmisible para sus víctimas y también para el poder y la competitividad de una nación. Los pasos que hoy se den en el combate contra la desnutrición y contra sus efectos mentales supondrán un gran avance en la mejora de la calidad de vida, y de la productividad, de amplios sectores de la población y, por tanto, de la sociedad entera.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NUTRITION AND BEHAVIOR. Dirigido por Janina R. Galler. Plenum Press, 1984.

THE EFFECTS OF IMPROVED NUTRITION IN EARLY CHILDHOOD: THE INSTITUTE OF NUTRITION OF CENTRAL AMERICA AND PANAMA (INCAP) FOLLOW-UP STUDY. Dirigido por Reynaldo Martorell y Nevin S. Scrimshaw, Suplemento del *Journal of Nutrition*, volumen 125, número 4S; abril de 1995.

THE RELATIONSHIP BETWEEN UNDERNUTRITION AND BEHAVIORAL DEVELOPMENT IN CHILDREN. Dirigido por Ernesto Pollitt. Suplemento del *Journal of Nutrition*, vol. 125, n.º 8S; agosto de 1995.

El sistema global de posicionamiento

Dos docenas de satélites a miles de kilómetros de altura permiten localizar personas en la superficie terrestre con notable precisión

Thomas A. Herring

El Boeing 737 de pasajeros inició su aproximación final. Obedeció con fiel exactitud las órdenes emanadas del piloto automático, desarrollando lo que parecía un aterrizaje perfecto de rutina. Pero no fue a causa del mal tiempo por lo que la aproximación se confió al piloto automático, que recibe las señales de navegación desde la torre de control para realizar el aterrizaje de categoría IIIA, en el que el piloto no ve la pista hasta que las ruedas tocan el suelo. En esta ocasión, la seguridad de la aeronave estaba encomendada a los satélites del sistema global de posicionamiento (GPS, *Global Positioning System*) del Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Estas modernas balizas, que flotan en el espacio a más de 20.000 kilómetros de altura, tenían la misión de guiar el avión hasta posarse con toda suavidad en tierra.

Al enfilar la pista el 737, las señales del GPS indicaron que la tierra estaba sólo a 100 metros debajo y el avión redujo su velocidad de descenso, confiando enteramente como en aterrizajes previos en el puntual y exacto control de los satélites. Pero de repente sonó la alarma del piloto automático: el equipo GPS había perdido el contacto con uno de los satélites vitales para la operación. Ante tal situación, el comandante tomó inmediatamente el control y aceleró los motores para abortar un aterrizaje que pudiera acabar en catástrofe.

Un análisis posterior reveló que la pérdida transitoria de señal la había causado un defecto en el programa informático del satélite GPS. Este fallo no se había detectado antes porque nadie había encomendado todavía una tarea tan exigente al sistema GPS. De hecho, el GPS se había diseñado con un margen de imprecisión de unos 100 metros. Unos años atrás pocos se habrían atrevido a imaginar que el GPS pudiera guiar un avión en su trayectoria de aterrizaje. Pero de entonces acá se ha conseguido elevar a un nivel sorprendente la precisión de la navegación por GPS, superando las previsiones más optimistas de quienes lanzaron los primeros satélites.

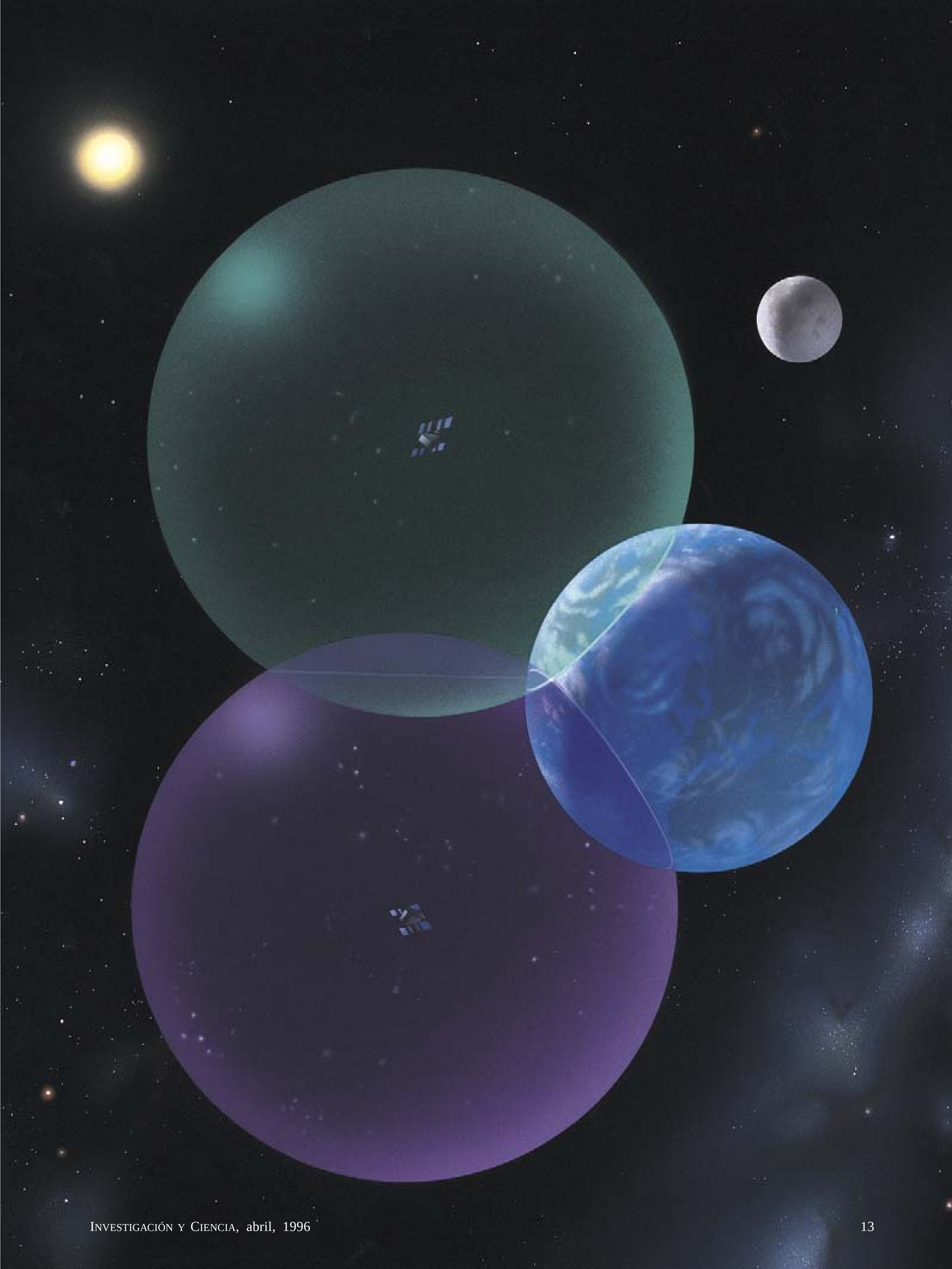
El Departamento de Defensa empezó a construir su avanzado sistema de posicionamiento por satélite a mitad de los setenta para que las unidades de su armada, aviación e infantería motorizada pudieran determinar su posición en cualquier lugar del mundo. Aunque su finalidad original eran las operaciones clasificadas, también se había previsto que los civiles pudieran utilizar las señales del satélite para su propia localización, si bien con menor precisión que las unidades militares. Se consideraba necesario reducir la precisión para las señales no clasificadas, pues de otro modo el enemigo tendría fácil acceso a las emisiones difundidas por el GPS, y este refinado sistema no aportaría ninguna ventaja estratégica a los Estados Unidos. A pesar de ello, los científicos e ingenieros ajenos al ámbito militar han ideado maneras de eludir la degradación deliberada de las señales del GPS, y hoy cualquier ciudadano puede conseguir resultados mucho mejores que los que nunca hubiera esperado el Departamento de Defensa.

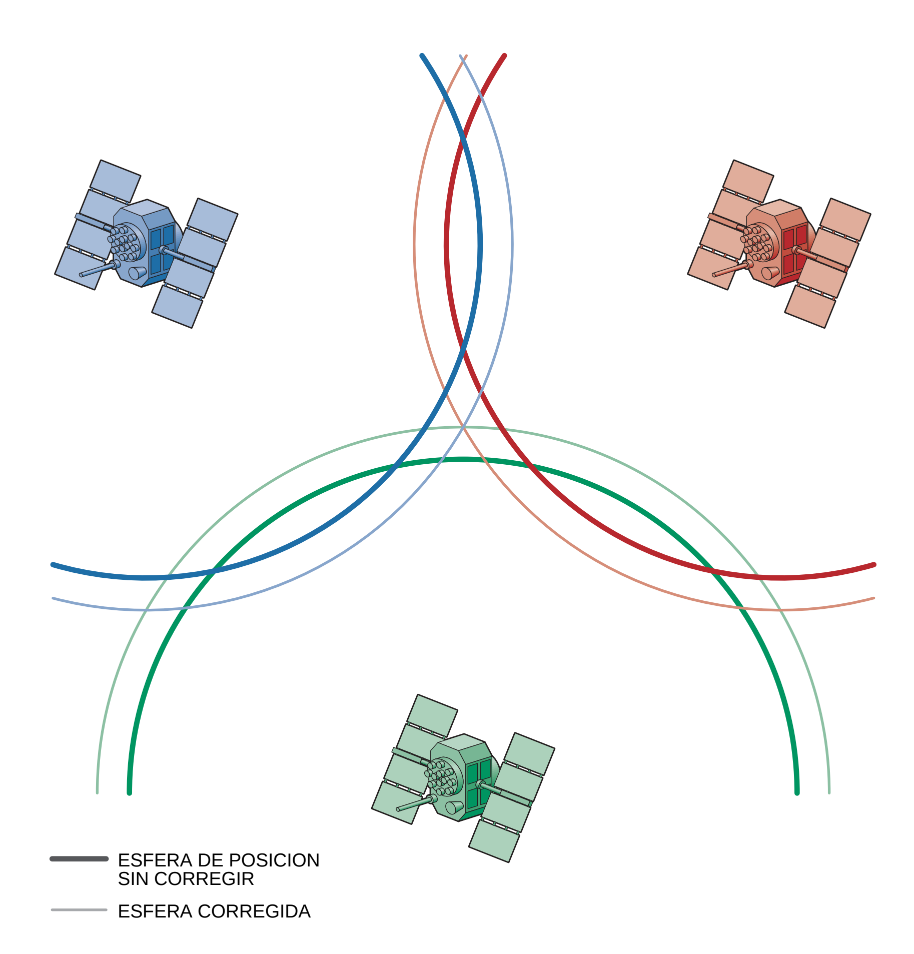
Tales progresos permiten que los radiorreceptores GPS guíen embarcaciones de recreo a través de la niebla o autocares de pasajeros por carreteras secundarias. Se recurre al sistema GPS hasta para registrar la posición de los buques de carga a través de los muelles del afanoso puerto de Singapur. Todavía impresiona más que con el equipo de inspección GPS puedan los geólogos medir los ligeros desplazamientos de la corteza terrestre, del orden de unos pocos milímetros, que muestran el movimiento de las placas tectónicas del planeta y ayudan a definir la situación y la extensión de las zonas propensas a terremotos.

Las imperfecciones que a veces aparecen durante estos ejercicios no se deben tanto a fallos reales como a haber llevado la instrumentación hasta límites nunca pretendidos por los creadores del GPS. Cabe preguntarse qué razones movieron al Departamento de Defensa a vedar a los civiles la precisión inherente al sistema, y por qué tanta gente ha logrado saltarse estas prohibiciones. Para obtener la respuesta hay que adentrarse en los mecanismos de la

THOMAS A. HERRING es profesor del departamento de ciencias terrestres, atmosféricas y planetarias del Instituto de Tecnología de Massachusetts, donde aprendió a aplicar sistemas de mediciones de precisión a los problemas geofísicos y se doctoró en 1983.

1. LAS ESFERAS DE POSICION indican la base geométrica del modo de operación del sistema global de posicionamiento (GPS). La recepción de emisiones codificadas permite a una persona situada en la Tierra determinar su distancia a varios satélites de órbitas exactamente definidas. Cada medición de distancia configura un conjunto de posiciones posibles sobre una esfera imaginaria (*en púrpura* o *verde*) con centro en el satélite que emite la señal. La intersección de las esferas con la superficie terrestre marca la ubicación exacta de la persona.





2. EL ERROR DE SINCRONIZACION en la electrónica de recepción origina una ligera incorrección en las mediciones de distancia a los satélites GPS, haciendo que las esferas de posición correspondientes (*líneas gruesas*) no se corten con nitidez en un punto único. Un pequeño ajuste, de retraso o adelantamiento, en el reloj del receptor corrige las mediciones de manera que todas las esferas (*líneas finas*) coincidan en un punto. En el dibujo se representan sólo tres satélites, pero en el espacio tridimensional el método requiere cuatro de ellos.

navegación por satélite en general y del GPS en particular.

Poco después de que los soviéticos lanzaran el *Sputnik* en 1957, hubo quienes se dieron cuenta de que las transmisiones de radio procedentes de un satélite situado en una órbita bien definida podían indicar la posición de un receptor en la superficie terrestre. El procedimiento se basa en el corrimiento por efecto Doppler de las señales radioeléctricas cuando el satélite pasa sobre nuestras cabezas. (A este mismo efecto se debe el cambio de tono en el silbido de un tren cuando la locomotora pasa frente a nosotros.) La armada de EE.UU. fue la primera en seguir este método para el sistema "Transit" de posicionamiento por satélite en los años sesenta.

Pero la técnica que aplicó la armada era bastante embarazosa. Se necesitaba un costoso equipo electrónico en tierra y lo normal era recibir las señales de dos pasadas distintas del satélite, lo que exigía una espera de más de 100 minutos. Incluso en las condiciones más favorables, con varios días para captar señales, no podía determinarse la posición con error inferior al metro, y esto limitaba bastante el empleo del posicionamiento por Doppler para inspecciones precisas del terreno.

Antes de poner en órbita el primer satélite Transit, el Departamento de Defensa estaba ya considerando un enfoque más refinado merced al cual, por ejemplo, el piloto de un cazarreactor pudiera determinar instantáneamente su posición exacta. En particular, la Fuerza Aérea de EE.UU. proyectaba un sistema de navegación basado en la determinación de distancia (*ranging*) —mediciones de distancias a varios satélites— en lugar del corrimiento Doppler en radiofrecuencia.

La idea de determinación de posición por distancias es bastante elemental. Supongamos que pueda asegurarse que un satélite está a 20.000 kilómetros de distancia. La posición de la persona se encuentra, pues, situada sobre una inmensa esfera de 20.000 kilómetros de radio en torno a dicho satélite. Como los satélites recorren órbitas estables y predecibles, la situación del satélite y de la esfera que lo rodea se conoce con toda exactitud.

Si al mismo tiempo que tomamos la primera determinación medimos también su distancia a un segundo satélite, podremos definir una segunda "esfera de posición", e igualmente una tercera esfera con un tercer satélite, etcétera. Habrá que buscar en las intersecciones de todas estas esferas las soluciones razonables al problema del posicionamiento. Dos esferas pueden cortarse en un círculo, pero tres esferas sólo pueden coincidir en dos puntos, uno de los cuales será absurdo por estar en las profundidades del planeta o en el espacio exterior. Basta, pues, con tres determinaciones por satélite para conocer la posición exacta.

La primera cuestión que abordaron los diseñadores del sistema GPS fue el grado de exactitud requerido en las mediciones de distancia. Podía elegirse entre muchas opciones. Por ejemplo, un equipo de radar podía medir el tiempo transcurrido entre la transmisión de un pulso de radiofrecuencia y la recepción del eco de ese pulso al reflejarse en el satélite. Partiendo de ese dato y de la velocidad del pulso de radio—igual a la de la luz— el ordenador calcula fácilmente la distancia al satélite.

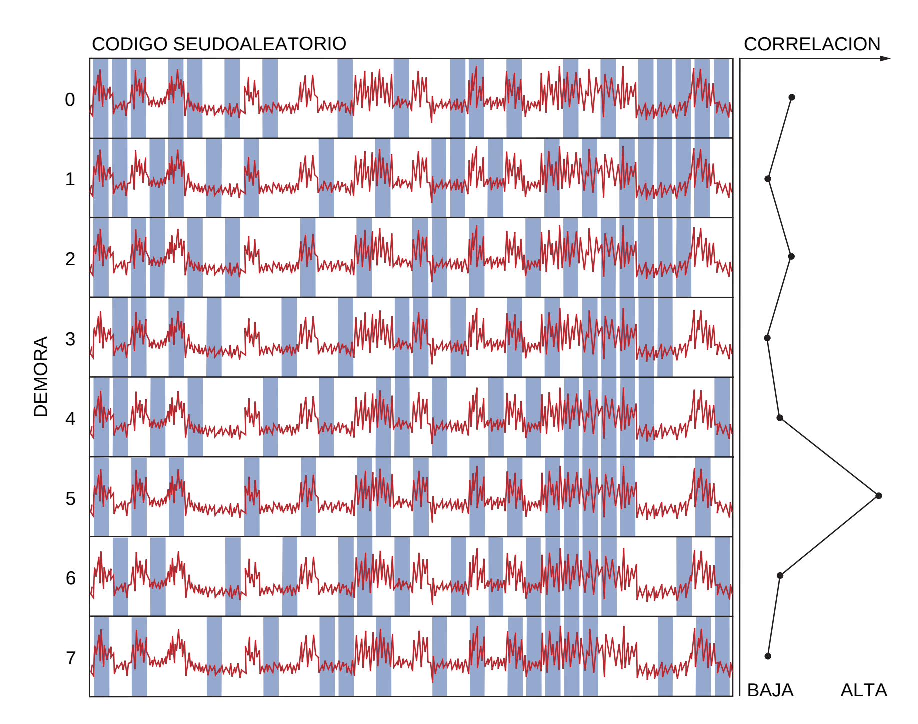
Pero este sistema obligaría a cualquiera que lo utilizase a emitir una secuencia de potentes ráfagas de radar, lo cual no es muy del agrado de soldados, marinos o pilotos que intentan no ser detectados por el enemigo. Por ello se buscó otra opción alternativa. Los satélites de navegación transmitirán pulsos de radiofrecuencia en momentos específicos, y los equipos receptores determinarán la distancia al satélite midiendo el instante exacto en que tales pulsos se reciben. Lo que requiere que el reloj del receptor esté sincronizado con el del satélite. Este concepto es la base del sistema global de posicionamiento.

A primera vista, la sincronización exacta puede parecer una exigencia muy severa; una discordancia de una millonésima de segundo acarreará un error cercano a los 300 metros. Si bien es posible equipar todos los satélites de navegación con relojes atómicos de extrema precisión, sería prohibitivo por el coste y la complejidad hacer lo mismo con todos los receptores. Pero hay un modo de

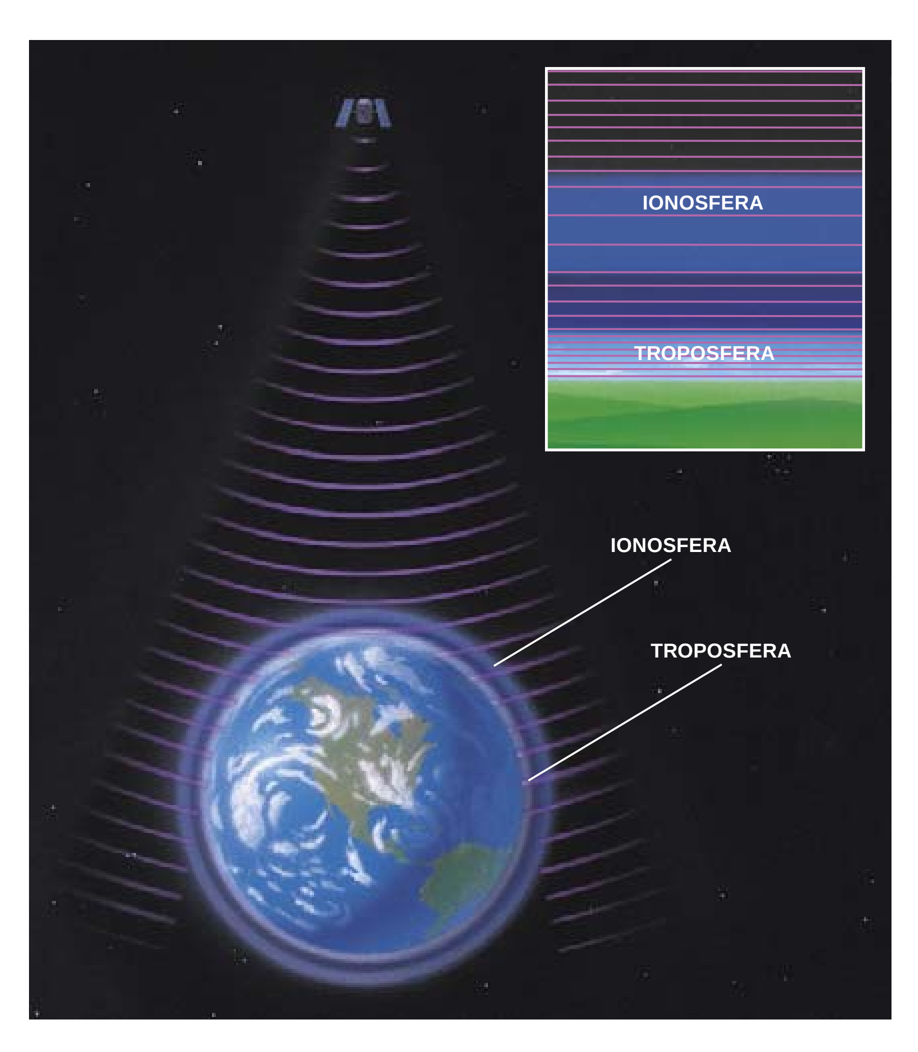
conseguir el mismo fin sin necesidad de relojes tan perfectos en tierra: basta con establecer en cuánto se ha desviado del tiempo correcto el reloj de inferior clase del receptor.

Esta tarea no implica especiales dificultades. Se empieza por suponer que el reloj del receptor marca aproximadamente la hora correcta para el cálculo de las distancias a cuatro satélites. En tales condiciones, las distancias calculadas, llamadas seudodeterminaciones, no serán totalmente correctas. Cada una de las cuatro corresponderá a una esfera imaginaria centrada en el satélite respectivo. Las cuatro esferas deberían cortarse en un punto único —la posición del receptor—, pero esto no sucederá al no estar los relojes del satélite y del receptor rigurosamente sincronizados. Si el reloj del receptor adelanta, las cuatro esferas serán algo mayores de lo debido, y un poco menores si dicho reloj atrasa. Ahora bien, es posible ajustar el error del reloj de tal modo que las cuatro esferas se corten en un solo punto, y ello se consigue mediante unos pocos cálculos algebraicos. Un sencillo receptor con un reloj electrónico no más complicado que un reloj digital de pulsera puede así sincronizarse con los relojes atómicos que discurren por el espacio.

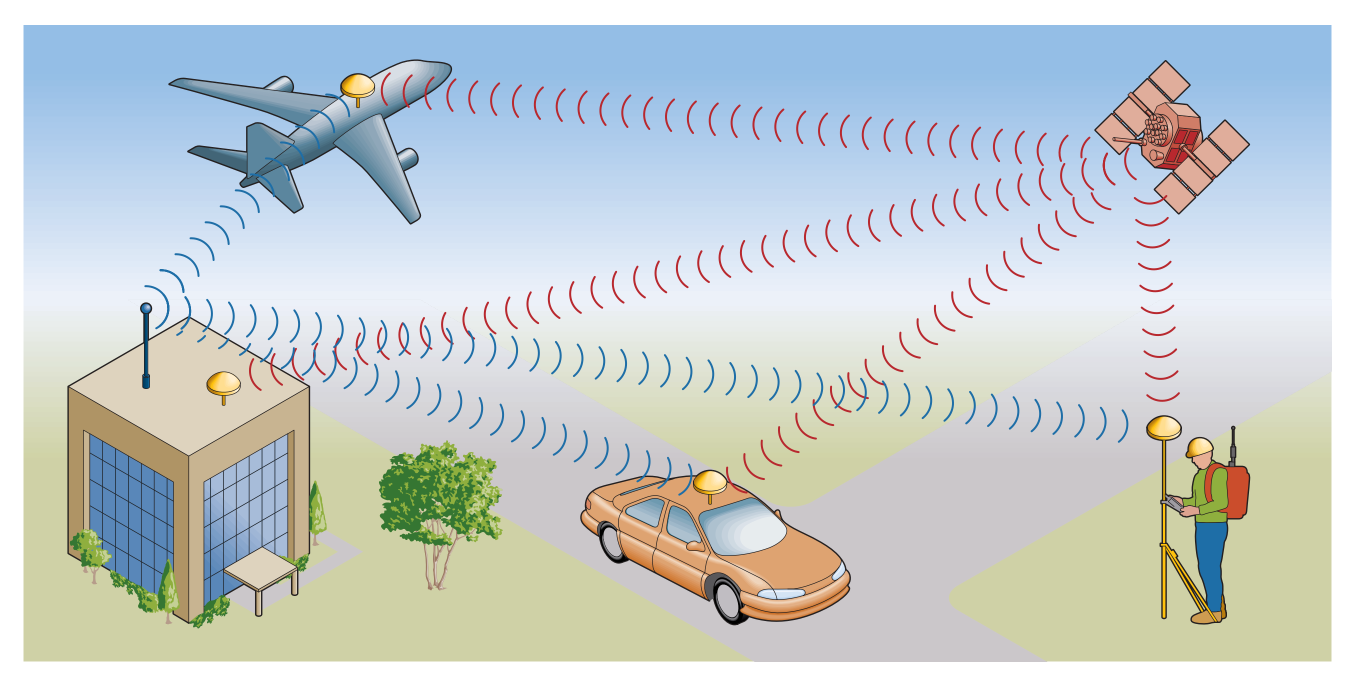
El siguiente paso fue decidir con qué exactitud habían de transmitirse las señales desde los satélites GPS. Se aplicó una técnica ya empleada en astronomía desde los años cincuenta para el examen de los planetas. Consistía en enviar pulsos de radar desde radiotelescopios gigantes en momentos aparentemente escogidos al azar, pero que en realidad se ajustaban a un código especificado con minucioso detalle. Los astrónomos llamaron a este tipo de cadencias secuencias seudoaleatorias. Con ellas se pudo entonces medir el retardo experimentado por las débiles reflexiones del radar en la superficie del planeta lejano determinando el



3. LAS SECUENCIAS SEUDOALEATORIAS emitidas desde satélites GPS en momentos dados llegan al receptor con un retardo que se determina comparando la señal recibida (*rojo*) con versiones de la secuencia conocida desfasadas en tiempo (*azul*). La correlación máxima entre la secuencia codificada y la señal (*derecha*) indica el intervalo de demora entre la transmisión y la recepción de las señales.



4. LAS CAPAS ATMOSFERICAS alteran las señales GPS y pueden introducir errores apreciables. Los efectos más importantes se producen al paso de las ondas de radio por una ionosfera cargada y una troposfera empapada en agua. En la ionosfera los frentes de ondas de radio tienden a separarse (*recuadro*), para juntarse en la troposfera. Midiendo estas alteraciones de las señales GPS en un receptor fijo, los servicios de meteorología pueden ahora determinar el contenido de agua de la atmósfera.



5. EL GPS diferencial elude los errores de sincronía que impone la seguridad militar. Un receptor fijo en una ubicación conocida determina los errores de sincronismo en las señales de satélite (*rojo*) y emite por radio las correcciones adecuadas (*azul*) a los receptores móviles de los alrededores. Este método reduce la imprecisión del posicionamiento GPS.

instante en que las señales recibidas y la secuencia seudoaleatoria transmitida coincidían con más precisión. En esencia, el tiempo de recorrido (del cual se obtiene la distancia al blanco del radar) se hallaba midiendo el instante en que la correlación de las dos señales era óptima.

Alentados por el éxito de los astrónomos, los ingenieros militares optaron por utilizar secuencias seudoaleatorias semejantes en el nuevo sistema espacial de posicionamiento. Pero en este caso se decidió que los satélites GPS emitirían continuamente hacia la Tierra ondas radio de alta frecuencia, en vez de pulsos discretos de radar. El uso de secuencias seudoaleatorias para codificar las emisiones radioeléctricas ofrecía muchas ventajas. Entre ellas, la de conseguir receptores GPS económicos que tanto apreciarían marinos y caminantes años más tarde. Todos los satélites podrían entonces transmitir a la misma frecuencia sin crear una confusa mezcla de interferencias; cada satélite GPS transmitiría un código de uso exclusivo, de manera que un receptor de frecuencia única, de bajo coste, pudiera separar fácilmente las diferentes señales.

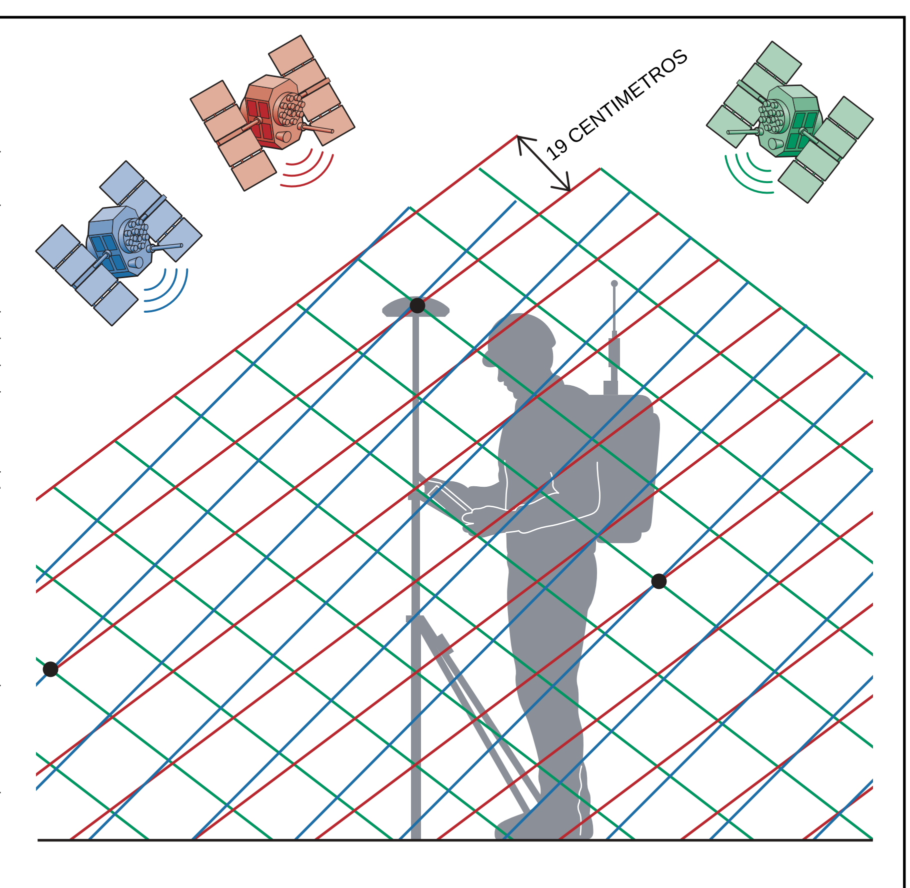
La decisión final de los expertos militares afectaba a la ubicación de los satélites. Casi todos los equipos de uso espacial se destinan a órbitas de dos tipos: las que rodean la Tierra a alturas pequeñas (órbitas bajas) y las órbitas geosincrónicas (período de 24 horas) fijadas a unos 36.000 kilómetros sobre el ecuador. Los lanzamientos en órbita baja cuestan relativamente poco y los transmisores del satélite sólo requieren una potencia modesta, pues no tienen que radiar señales a grandes distancias. Pero habría que situar en órbita cientos de satélites para conseguir una cobertura mundial. Por otra parte, la elevada órbita geosincrónica exige muchos menos satélites, pero cada uno de ellos necesita un transmisor más potente y habría dificultad en que las señales alcanzaran las zonas polares terrestres.

Al planificar el GPS se eligió una solución de compromiso, que consistía en situar los satélites en órbitas ni especialmente altas ni bajas, a unos 20.000 kilómetros de altura. En esas órbitas, 17 satélites serían suficientes para garantizar que siempre estén



6. LA NAVEGACION A CIEGAS ya no está limitada a los barcos en la niebla. Los invidentes pueden apoyarse en el GPS para deambular por el exterior. Esta aplicación experimental, entre otras, sería mucho más fácil sin la confusión que introducen las medidas de seguridad militares.

Atrapando las ondas



Desde mediados de los años ochenta se aplica el GPS a la vigilancia de las lentas e incesantes deformaciones que sufre la corteza terrestre en regiones geológicamente activas, susceptibles de concluir en fracturas o terremotos. En estas investigaciones se exige una precisión máxima al GPS, y para ello suele aplicarse lo que se llama rastreo de portadora. Comparada con el GPS diferencial (capaz de localizar una posición dentro de un margen de un metro), esta técnica permite fijar la posición con error de milímetros.

El rastreo de portadora recibe tal nombre de las emisiones del satélite que transportan las señales GPS sobre un conjunto de ondas portadoras de radio. Consiste en determinar qué parte de la onda incide en la antena en un momento dado, es decir, la "fase" de la emisión recibida. A semejanza de un nadador que detecta si está en una cresta o en el seno de una ola, o en cualquier punto intermedio, el rastreo de portadora identifica en qué punto de la onda de radio, de 19 centímetros de longitud, del GPS se asienta la antena receptora.

Mediante el rastreo de portadora se alcanzan resoluciones de una minúscula fracción de la longitud de onda. La dificultad principal estriba en determinar cuál de las numerosas ondas idénticas es la que detecta la antena. Hay, sin embargo, maneras de suprimir esta ambigüedad. La más sencilla consiste en rastrear simultáneamente la fase de las portadoras procedentes de varios satélites. Si la antena receptora resulta estar situada en el origen de las ondas (con fase cero) enviadas desde tres satélites diferentes, habrá un limitado número de puntos en los que tal coincidencia sería posible (*dos puntos marcados en el diagrama*). Si hay suficientes satélites, los puntos posibles estarán separados más de un metro. De ahí que, conociendo la posición aproximada de la antena por la técnica GPS diferencial, pueda determinarse cuál de los puntos localizados por el rastreo marca la ubicación correcta.

En la práctica, el rastreo de portadora constituye una tarea delicada, en la que hay que tener en cuenta el paso de las ondas y el movimiento de los satélites. Ciertas aplicaciones, como el sistema de aterrizaje de aviones desarrollado por Bradford W. Parkinson y sus colegas de la Universidad de Stanford, requieren equipos especiales para garantizar la integridad de las soluciones de navegación. Todo este trabajo se ve entorpecido por las disposiciones de seguridad que ha adoptado el Departamento de Defensa norteamericano (contramedidas de guerra electrónica). Como ocurría con la codificación de errores de reloj (disponibilidad selectiva), esta nueva disposición encarece y dificulta muchas de las maravillosas aplicaciones civiles de alta precisión del GPS.

—*T. A. H.*

al menos cuatro de ellos —mínimo número requerido para determinar una posición— al alcance de cualquier lugar de la superficie terrestre. La configuración que terminó por adoptar el GPS consta de 21 satélites primarios y tres de reserva en órbita.

Las Fuerzas Armadas de EE.UU. se proponían aprovechar las ventajas tácticas del nuevo sistema de navegación por satélite. Desde un principio codificaron las emisiones de radio para impedir que los adversarios también aprendieran a determinar posiciones con exactitud. No obstante, el Departamento de Defensa anunció que iba a permitir el uso del GPS por gente corriente, al menos de un modo aproximado. Los diseñadores se plantearon entonces cómo podía limitarse la precisión en usos civiles, al tiempo que se permitía a los militares explotar todas las posibilidades del sistema. Había varias maneras de conseguir este funcionamiento dual. Uno de los métodos consistía en transmitir información incorrecta a los usuarios no autorizados acerca del momento exacto en que los satélites habían enviado señales. Puede provocarse un ligero desajuste en la sincronización del GPS alterando los relojes atómicos de los satélites con arreglo a un código específico. Esta "fluctuación" de los relojes, denominada "disponibilidad selectiva", parece ser el medio utilizado por el Departamento de Defensa para mantener la seguridad del GPS. Las señales modificadas permiten que todos los ciudadanos determinen su ubicación con razonable precisión, con errores de posición no superiores a 100 metros. Por su parte, los receptores militares equipados para interpretar códigos clasificados pueden fácilmente establecer una posición más exacta suprimiendo los errores de sincronismo que se hayan añadido.

Los científicos e ingenieros civiles interesados en el GPS no tardaron mucho, sin embargo, en encontrar maneras de esquivar las limitaciones de la disponibilidad selectiva. Poco después de haber lanzado el primer grupo de estos satélites, se habían hallado medios para reducir los errores del GPS —a veces hasta sólo de algunos milímetros— logrando un nivel de precisión miles de veces superior a lo que creyeran posible los diseñadores militares. La primera demostración de tal capacidad la realizaron de un modo informal Charles C. Counselman III, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), y sus colegas, en el aparcamiento del Observatorio de Haystack en Westford, durante el otoño de 1980.



7. LA DEFORMACION de la corteza terrestre en zonas de actividad geológica como el Tien Shan de Asia Central puede medirse aplicando un examen preciso de marcas de referencia por el GPS. La técnica GPS sirve así de instrumento para vigilar la acumulación de tensiones capaz de causar devastadores terremotos.

Para conseguir una mejora sustancial en la precisión, los científicos de Haystack y del MIT tenían que corregir los errores de los relojes atómicos de los satélites GPS. Para ello emplearon una técnica muy simple: desde un punto fijo en el suelo midieron las señales procedentes de varios satélites. Conociendo la posición exacta de la antena receptora y las posiciones de los satélites, compararon fácilmente las seudodistancias (que habían medido) con las distancias reales (que podían calcular). La diferencia entre ambos valores representaba el error de reloj del satélite, sumado a cualquier inexactitud del reloj utilizado por el equipo receptor en tierra. El examen simultáneo de varios satélites permitió determinar el error de reloj en tierra y, a partir de ahí, se pudo hallar con exactitud el desajuste del reloj en cada satélite.

Hoy día puede utilizarse el mismo método para escapar a la disponibilidad selectiva. Es posible determinar el valor de fluctuación de los relojes en una estación terrestre fija, y emitir por radio las correcciones. Los equipos móviles GPS que operen en las proximidades podrán utilizar esa información para calcular las posiciones exactas. Este sistema “GPS diferencial” ofrece a los usuarios civiles medios para conocer su ubicación con error inferior a un metro utilizando equipos sorprendentemente económicos. (Existen receptores GPS más especializados capaces de alcanzar precisiones de hasta un centímetro.) Se dispone ya de multitud de fuentes que proporcionan las correcciones del GPS diferencial. La Administración Federal de Aviación, por ejemplo, está empezando a ofrecer estos servicios a los aviones. La Guarda Costera transmite también correcciones en las cercanías de los puertos principales. Además, varias compañías comerciales venden correcciones de GPS para la mayoría del territorio norteamericano, así como para otras regiones del mundo.

La amplia disponibilidad del GPS diferencial ha suscitado vivos debates sobre qué motivos mueven al Ejército de EE.UU. a seguir gastando dinero en codificar el GPS en tiempos de paz, obligando a otros sectores del gobierno a invertir todavía más recursos en decodificar los errores y difundir los resultados por radio. Resulta paradójico que durante dos recientes operaciones militares, la guerra del golfo Pérsico y la ocupación de Haití, el Departamento de Defensa desactivara las medidas de seguridad del GPS. Y lo hizo porque no disponía de suficientes equipos GPS clasificados para desplazarse, mientras que los modelos civiles eran bastate fáciles de conseguir.

Por su lado, el gobierno ruso está dando los últimos toques a un sistema de posicionamiento por satélite llamado GLONASS (acrónimo de “Global Navigation Satellite System”) que se parece mucho al GPS. El sistema de navegación ruso, sin embargo, no codifica sus emisiones de radio; por tanto, cualquiera que disponga de un equipo apropiado puede aprovecharse plenamente del sistema. La existencia del GLONASS no codificado, unida a la general disponibilidad de las correcciones del GPS, parece desmentir cualquier ventaja militar que pudiera provenir de la degradación deliberada de los relojes de satélites. Un reciente estudio realizado por la norteamericana Academia Nacional de Ciencias advierte que la disponibilidad selectiva es ineficaz y recomienda su abandono. Pero el Departamento de Defensa sigue con su técnica de fluctuación, tanto en tierra como en el espacio.

A cada semana que pasa, parecen brotar nuevas aplicaciones inteligentes del posicionamiento por satélite. En su elaboración de las predicciones climáticas, los meteorólogos miden los retardos que introduce la atmósfera en las señales del GPS. Los agricultores utilizan este equipo para examinar el estado de cada metro cuadrado de sus tierras con el fin de poder distribuir los fertilizantes con la máxima eficacia. Y lógicamente el GPS es cada vez más útil para guiar barcos, aeronaves, helicópteros, satélites e incluso autobuses de pasajeros. Se ensayan sistemas transportados en mochila para guiar a los invidentes. Sin duda, las aplicaciones comerciales superan mucho en número a los servicios militares que presta el sistema, y al final del milenio la venta de servicios de GPS deberá aportar alrededor de 125.000 millones de pesetas por año a la economía de los Estados Unidos. Con inusitada rapidez, lo que nació siendo un sistema militar se ha convertido en un recurso económico abierto. En un mundo de cambios vertiginosos, debemos preguntarnos: ¿quién debe controlar el sistema global de posicionamiento?

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE NAVSTAR GLOBAL POSITIONING SYSTEM. Tom Logsdon. Van Nostrand Reinhold, 1992.

GPS WORLD. Revista bimestral publicada por Advanstar Communications, 859 Williamette Street, Eugene OR 97401.

Dirección del Servicio Internacional de Geodinámica GPS en la World Wide Web: http://igscb.jpl.nasa.gov/

Aplicación del GPS al tráfico rodado

A la navegación por satélite se le pronostica una expansión tan rápida y espectacular como la que tuvo la comunicación sin hilos. Además, ambas técnicas trabajan asociadas. Algunos coches disponen ya de sistemas de guía —accesorios que permiten al conductor llegar a un destino en un lugar que no le es familiar. Alemania cuenta con dos prototipos. En el mercado japonés, donde los sistemas de guía se introdujeron ya en 1987, encontramos más de veinte categorías de funcionalidad y precio. La calidad de tales sistemas dependerá de los componentes que puedan acoplarse con el GPS: fuentes de información, fuentes de procesamiento y entradas y salidas de datos.

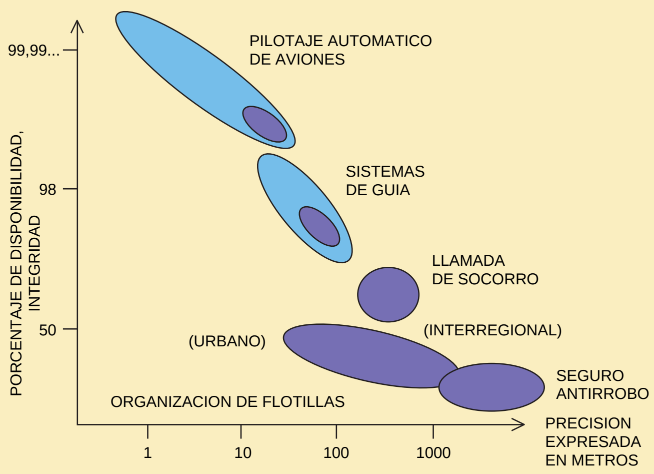
Entre las fuentes de información numeraremos los mapas electrónicos. Pueden ser vectoriales o reticulares. Los mapas vectoriales describen el punto de origen y el punto de destino del trayecto; son idóneos, pues, para la búsqueda de rutas. Los reticulares se limitan a trasponer en píxeles los mapas cartográficos. Cumple a las fuentes de procesamiento proporcionar una ruta entre el punto de partida y de meta escogidos, junto con propuestas alternativas. La posición medida por GPS puede acoplarse al trayecto y superponerla sobre el mapa vectorial. Por su parte, las entradas y salidas de datos no se limita a la edición de textos; por ejemplo, direcciones que se han de tomar en los cruces. Se puede crear un mapa en color sobre una pantalla donde aparezca la ruta seguida y la recomendada.

Los sistemas que alcanzan mayor aceptación son los que ayudan al conductor con un mapa detallado que contenga la información sobre el tráfico pertinente para determinar la ruta: dirección única, prohibido girar, cambio de sentido, etcétera. Pero el sistema GPS pierde precisión en zonas urbanas. Allí, la atenuación de las señales obliga a recurrir complementariamente a sistemas sensores y a la superposición de mapas vectoriales.

La conducción enteramente automática es todavía un sueño, que se hace realidad sólo en salas de exhibición o en autobuses de dirección mecánica sobre carriles. Pero se avanza. En distintos proyectos de investigación, entre otros, el Prometeo europeo, se ha logrado ya identificar la situación del tráfico en determinado trayecto mediante la combinación de ordenador y vídeo. Avances que se aprovechan y completan con el recurso al sistema GPS cuando se trata de operar máquinas destinadas a la construcción o al transporte en espacios limitados y con condiciones de recepción bien definidas. En el tráfico real el sistema GPS se podrá utilizar sólo como complemento para la cámara, el radar y el láser.

La policía y los servicios de socorro, las centrales de taxis, los servicios de mensajería, empresas de reparto y transportes, que emplean flotillas de vehículos, suelen organizar su operación desde una central. Para la disposición, planificación y administración, ésta tiene que disponer de ordenadores y programas adecuados. Las unidades móviles se mantienen en contacto con la central por transmisión oral de los datos. En particular, para la organización de las flotillas en zonas urbanas es muy útil conocer la situación real de los vehículos, a fin de optimizar su recorrido. El vehículo lleva integrado un accesorio de localización en contacto permanente o solicitado, con la central. Hasta hace poco, el procedimiento habitual para la localización era por radio; ahora se va imponiendo cada vez más el sistema GPS.

En el proyecto Prometeo se diseñaron modelos de llamada de socorro automática que más tarde desarrollaría Mercedes Benz. En líneas generales se trata de una señal de socorro automática que se transmite por comunicación móvil a una central en cuanto el sensor de choques registra el golpe recibido por el vehículo. El sistema mantiene la posición del vehículo a través de la unidad de GPS integrada, de modo que pueda transmitirse el lugar del accidente y el sentido en el que circulaba el vehículo. No necesitan ponderación las ventajas que ello reporta: rapidez y eficacia de la asistencia, en particular, si el vehículo accidentado transportara algún material peligroso.



Requisitos cualitativos para las componentes de GPS y la función de localización en general **(elipses exteriores)** ***en las aplicaciones en el tráfico de automóviles.***

Los coches más apreciados suelen llevar ya incorporados bloqueadores electrónicos contra el robo. Su seguridad está garantizada siempre que el ladrón no posea la llave o el código electrónico o no obligue bajo amenaza al dueño para que se lo revele. Este riesgo podría evitarse con un sistema de control remoto. Por una parte, con la comunicación móvil y por satélite podría activarse el sistema de bloqueo del vehículo. Ya existen accesorios de combinación de la comunicación móvil con GPS, que sirven para seguir la pista a coches robados. También podrían idearse sistemas de bloqueo autónomo al objeto de que el automóvil circulase sólo por una zona predeterminada, de cuya comprobación se encargaría el sistema de seguridad del automóvil con ayuda de su localización por GPS.

La componente de GPS contenida en las aplicaciones descritas cumple funciones distintas según el sistema. Las exigencias de exactitud de posicionamiento, fiabilidad e integridad de los datos varían, asimismo. En los núcleos metropolitanos, la disponibilidad de las señales GPS está limitada por la interposición de los edificios; además, la determinación de la posición es menos exacta debido a que los satélites visibles desde las calles suelen tener posiciones geométricamente desfavorables. (Las intersecciones de las esferas no son perpendiculares entre sí.) Por no hablar de las reflexiones de las señales, que son fuente de error.

Telómeros, telomerasa y cáncer

La telomerasa, enzima un tanto insólita, actúa sobre los extremos de los cromosomas, los telómeros. Detectada en muchos tumores humanos, está en el punto de mira de las terapias contra el cáncer

Carol W. Greider y Elizabeth H. Blackburn

En la naturaleza las cosas no siempre son lo que parecen. Lo que semeja una roca del fondo del mar puede ser en realidad un pez venenoso; la flor de jardín que admiramos, quizás una planta insectívora en espera de su presa. La apariencia engañosa también se da en los cromosomas, componentes celulares. Los cromosomas son ristras de ADN lineal donde se encuentran los genes. Creíase antaño que el ADN de los extremos de los cromosomas era estático. Sin embargo, en la mayoría de los organismos estudiados, los extremos de los cromosomas, denominados telómeros, están siempre cambiando. Se acortan y alargan sin cesar.

Durante los últimos quince años, la investigación de este inesperado fenómeno ha deparado numerosos descubrimientos. En particular, ha permitido identificar una enzima extraordinaria, la telomerasa, que actúa sobre los telómeros y que se la supone necesaria para el mantenimiento de muchos cánceres humanos. Este último hallazgo ha disparado las especulaciones sobre la posibilidad de emplear drogas que, al inhibir la enzima, atajen diversos tipos de neoplasias. Cabe, también, que ciertos cambios en la longitud del telómero se hallen involucrados en el proceso de envejecimiento de las células humanas.

CAROL W. GREIDER y ELIZABETH H. BLACKBURN comenzaron su colaboración en 1983, cuando Greider se integró en el laboratorio de Blackburn, en la Universidad de California en Berkeley. Greider, que se doctoró en biología molecular por Berkeley, es ahora investigadora de plantilla del Laboratorio de Cold Spring Harbor. Blackburn, que se formó en la Universidad de Cambridge, en 1975, enseña microbiología e inmunología en la de California en San Francisco.

El interés actual por telómeros y telomerasas tiene su origen en experimentos realizados en los años treinta por Barbara McClintock y Hermann J. Muller, a la sazón en las universidades de Missouri y Edimburgo, respectivamente. Por separado, y con organismos distintos, ambos genéticos percibieron que los cromosomas portaban en sus extremos un componente especial que les confería estabilidad. Muller acuñó el término "telómero", del griego "final" (*telos*) y "parte" (*meros*). MacClintock observó que, sin esas estructuras terminales, los cromosomas se pegaban unos con otros, sufrían cambios estructurales y presentaban comportamientos extraños. Actividades todas ellas que amenazan la supervivencia y fidelidad de la replicación de los cromosomas y, en consecuencia, de las células que los portan.

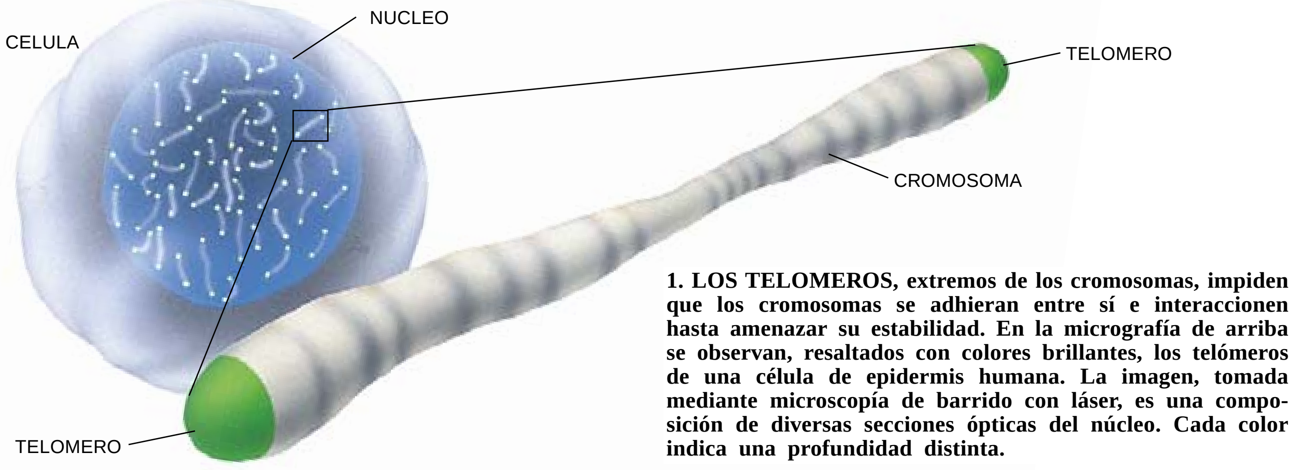
No fue hasta los años setenta, sin embargo, cuando se determinó la composición de los telómeros. En 1978, una de las autoras (Blackburn), cuando trabajaba con Joseph G. Gall, en la Universidad de Yale, encontró que los telómeros de *Tetrahymena* contenían una secuencia de nucleótidos muy corta —*TTGGGG*— que se repetía muchísimas veces. (Los nucleótidos son los "ladrillos" que conforman el ADN. Se suelen designar con letras que representan las bases químicas que distinguen a unos de otros: la base del nucleótido *T* es timina, la del nucleótido *G* es guanina.) *Tetrahymena* es un ciliado unicelular que vive en las charcas.

De entonces acá se han caracterizado los telómeros de muchos animales, plantas y microorganismos. Como ocurre en *Tetrahymena*, la mayoría de telómeros —incluidos los de ratones, humanos y otros vertebrados— contienen secuencias cortas y repetidas que suelen ser ricas en nucleótidos *T* y *G*. Por ejemplo, en humanos y ratones la secuencia es *TTAGGG*; en las lombrices, *TTAGGC* (*A* indica adenina y *C*, citosina).

Se llegó al descubrimiento de la telomerasa a raíz de la comparación de la longitud de los telómeros; dicho cotejo sugirió que una enzima de esas características podría resolver un antiguo rompecabezas de la biología. A principios de los años ochenta, las investigaciones habían revelado que, por alguna razón, el número de subunidades repetidas de los telómeros difería de un organismo a otro, e incluso entre distintas células del mismo organismo. Además, en una célula determinada, el número podía fluctuar a lo largo del tiempo. (Cada especie, sin embargo, tiene una media característica. En *Tetrahymena*, el telómero medio presenta 70 repeticiones; en humanos, 2000.) La heterogeneidad observada llevó a Blackburn, que ya se había trasladado a Berkeley, Jack W. Szostak, de la Universidad de Harvard, y Janis Shampay, de Berkeley, a proponer una nueva solución del "problema de la replicación de los extremos".

El problema tiene que ver con la fiel replicación de los genes que las células deben acometer cada vez que se dividen. De esa forma, cada célula hija recibe un lote completo. Si una de las células hijas no recibe el lote completo, funcionará mal y morirá. (Los genes son las secuencias de nucleótidos que portan información para la síntesis de proteínas y ARN, moléculas que llevan a cabo la mayoría de las funciones celulares. Los genes se distribuyen a lo largo del ADN que está flanqueado por los dos telómeros presentes en cada cromosoma.)

En 1972, James D. Watson, que trabajaba en Harvard y en el Laboratorio de Cold Spring Harbor, observó que las polimerasas de ADN, enzimas que replican el ADN, eran incapaces de copiar en su totalidad los extremos de los cromosomas lineales. La maquina-



1. LOS TELOMEROS, extremos de los cromosomas, impiden que los cromosomas se adhieran entre sí e interaccionen hasta amenazar su estabilidad. En la micrografía de arriba se observan, resaltados con colores brillantes, los telómeros de una célula de epidermis humana. La imagen, tomada mediante microscopía de barrido con láser, es una composición de diversas secciones ópticas del núcleo. Cada color indica una profundidad distinta.

ria de replicación dejaba sin copiar una estrecha región terminal, un trozo de telómero [*véase el recuadro*]. En teoría, si las células no compensasen esta falta, los cromosomas se acortarían en cada ronda de división celular. Con el tiempo, esa erosión constante terminaría por eliminar los telómeros y algunos genes decisivos. Las células implicadas morirían, lo que significaría el final de ese linaje celular. Resultaba obvio que todas las especies unicelulares sujetas a esa suerte de acortamiento debían arreglárselas para contrarrestarlo; si así no fuera, habrían desaparecido hace mucho tiempo. Lo mismo ocurría con las células de la línea germinal (por ejemplo, las precursoras de óvulos y espermatozoides), encargadas de perpetuar las especies en el caso de los organismos pluricelulares. ¿Cómo protegían las células sus telómeros?

Para Blackburn, Szostak y Shampay, las fluctuaciones observadas en la longitud de los telómeros constituían una señal de que las células se esforzaban por mantener los telómeros con un tamaño más o menos constante. Efectivamente, los telómeros se acortan durante la división celular, pero también se alargan tras la adición de subunidades teloméricas recién sintetizadas. Sospechábamos que la fuente de estas repeticiones adicionales se escondía en alguna enzima desconocida capaz de hacer algún truco que la polimerasa de ADN normal era incapaz de realizar.

Cuando las células replican sus cromosomas, que están formados por dos cadenas de ADN enrolladas una sobre la otra, el primer paso consiste en separar esa doble hélice. Las polimerasas utilizan las dos cadenas “progenitoras” (o “parentales”) como molde para construir una nueva compañera. La enzima especial que Blackburn, Szostak y Shampay imaginaban debería ser capaz de extender las cintas monocatenarias de ADN a partir de cero, sin el apoyo de un molde previo de ADN.

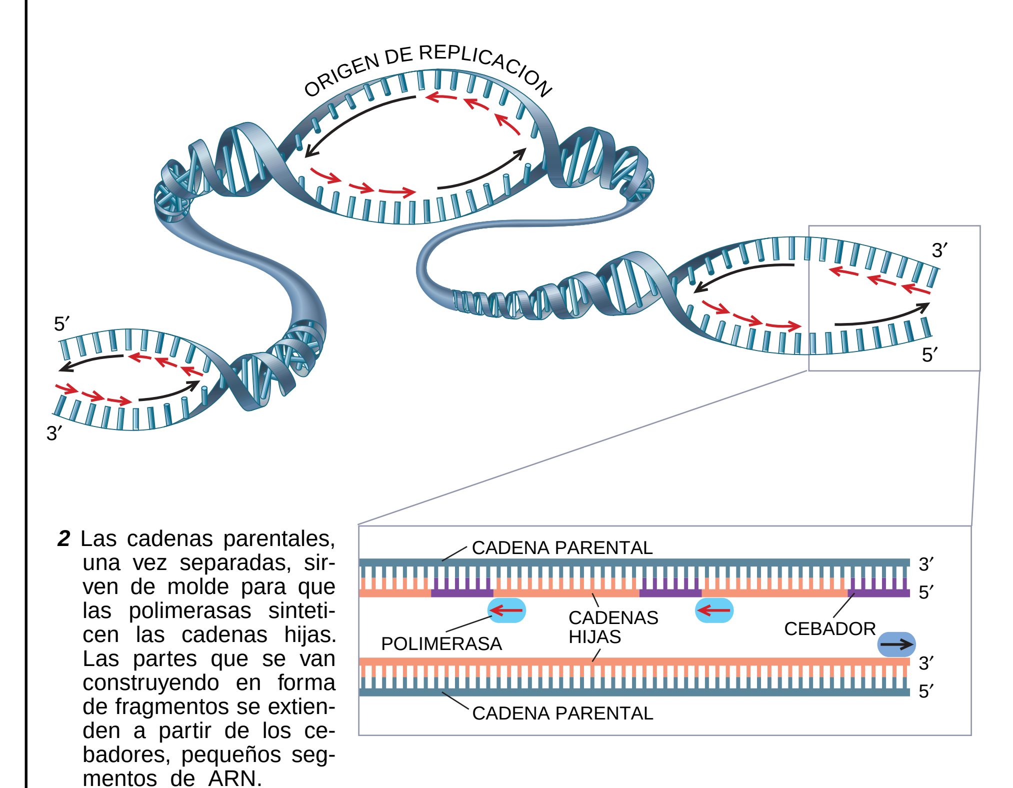
En 1984, Greider y Blackburn se propusieron averiguar, en el laboratorio de la segunda en Berkeley, si esa preconizada enzima alargadora de telómeros —la telomerasa— existía realmente. Con júbilo comprobamos que así era. Cuando mezclábamos telómeros sintéticos con extractos de células de *Tetrahymena*, los telómeros iban incorporando nuevas subunidades, como cabía esperar si la enzima en cuestión se hallaba presente.

Fuimos ahondando con los años en el modo de operar de la telomerasa. Como todas las polimerasas, y casi

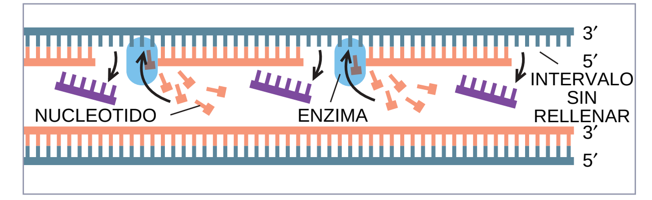
El problema de la replicación de los extremos

Se plantea el problema de la replicación de los extremos cuando los mecanismos normales de replicación cromosómica son incapaces de llevar a término su tarea. Siempre que las polimerasas de ADN copian las dos cadenas originales, o “progenitoras”, de ADN presentes en el cromosoma, las nuevas cadenas “hijas” resultantes son un poco más cortas por uno de sus extremos (5′). Si las células no compensasen este defecto del mecanismo de replicación, los cromosomas se acortarían inexorablemente. A principios de los años ochenta se propuso que la telomerasa, enzima que alarga los telómeros, era la solución del problema de la replicación de los extremos.

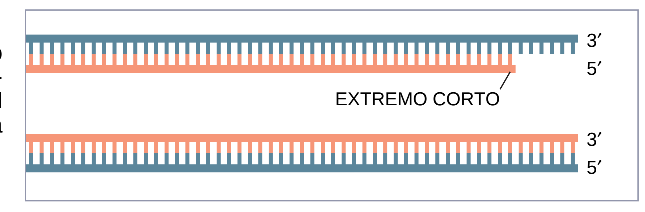
1 La replicación del ADN cromosómico, esquematizada, comienza en regiones denominadas orígenes de replicación, por donde las cadenas progenitoras (“parentales”) se separan. La síntesis de las dos cadenas hijas se produce de manera continua (*flechas negras*) hacia un lado de esas regiones y de manera discontinua (*flechas rojas*) hacia el lado opuesto.



2 Las cadenas parentales, una vez separadas, sirven de molde para que las polimerasas sintetícen las cadenas hijas. Las partes que se van construyendo en forma de fragmentos se extienden a partir de los cebadores, pequeños segmentos de ARN.



3 Otras enzimas eliminan los cebadores y rellenan los intervalos entre fragmentos adyacentes.



4 Pero las enzimas no pueden rellenar el intervalo que queda en el extremo 5′ de cada una de las cadenas hijas.

Resolución del problema por la telomerasa

De acuerdo con cierto modelo de la resolución del problema de la replicación de los extremos por la telomerasa, la enzima añade ADN a los cromosomas antes de que comience la replicación. El ADN agregado consta de una o varias subunidades teloméricas, que son secuencias cortas de nucleótidos que se repiten muchas veces en los telómeros. Este añadido asegura que las cadenas hijas serán al menos tan largas como sus progenitoras.

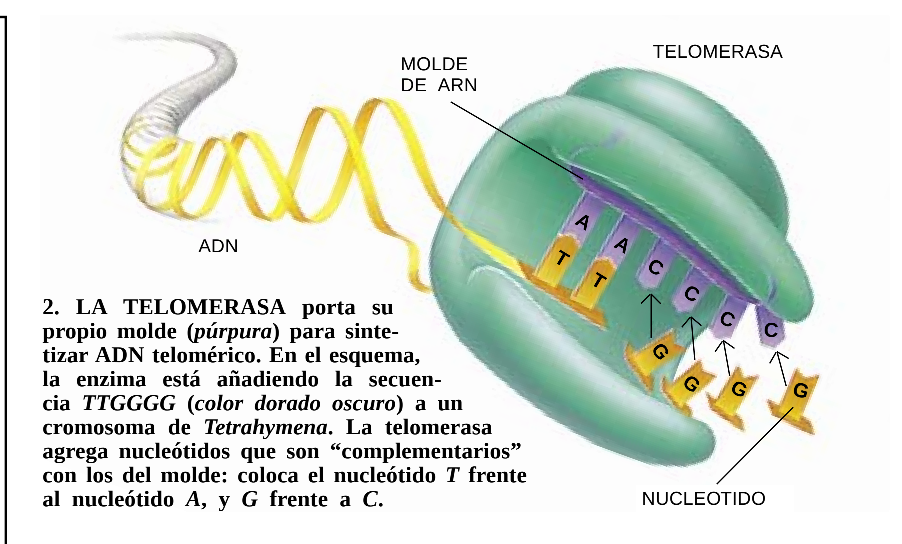
1 Antes de que comience la replicación, la telomerasa añade algunas repeticiones teloméricas (*color dorado*) a uno de los extremos de cada cadena parental.

2 Las cadenas parentales se separan.

3 Las cadenas hijas se sintetizan en la forma usual.

4 Se eliminan los cebadores y se rellenan los huecos internos.

5 Las cadenas hijas tienen la misma longitud que sus parentales originales (*gris*).



2. LA TELOMERASA porta su propio molde (*púrpura*) para sintetizar ADN telomérico. En el esquema, la enzima está añadiendo la secuencia *TTGGGG* (*color dorado oscuro*) a un cromosoma de *Tetrahymena*. La telomerasa agrega nucleótidos que son "complementarios" con los del molde: coloca el nucleótido *T* frente al nucleótido *A*, y *G* frente a *C*.

todas las enzimas, el componente mayoritario es proteína, polipéptido del que precisa para funcionar. Lo extraordinario es que también incluye una molécula de ARN (primo hermano del ADN) que contiene el molde nucleotídico necesario para construir las subunidades teloméricas. La telomerasa acerca el extremo de una cadena de ADN a ese ARN y se coloca ella misma de suerte tal, que el molde se sitúa junto a ese extremo. A continuación, la enzima va añadiendo nucleótidos de ADN, hasta que forma una subunidad telomérica. Cuando la subunidad está completa, la telomerasa puede deslizarse hacia el nuevo extremo del cromosoma y agregar una nueva subunidad, repitiendo el proceso de síntesis.

En 1988, Greider dejó Berkeley y se instaló en el Laboratorio de Cold Spring Harbor. Posteriormente, nuestros grupos y otros encontraron telomerasas en otros ciliados, así como en levaduras, ranas y ratones. En 1989, Gregg B. Morin, de Yale, la descubrió también en una línea celular procedente de un cáncer humano, esto es, células malignas mantenidas durante generaciones en cajas de cultivo. Nadie pone hoy en cuestión que casi todos los organismos con células dotadas de núcleo diferenciado sintetizan su propia telomerasa. La estructura de la enzima puede diferir de una especie a otra, pero todas las versiones poseen un molde de ARN específico de cada especie para construir las repeticiones teloméricas.

La importancia de la telomerasa en muchos organismos unicelulares es ahora indiscutible. Estos organismos son inmortales en el sentido de que, salvo accidentes o intromisiones de los genéticos en su vida, pueden dividirse indefinidamente. Como demostró Guo-Liang Yu, del grupo de Blackburn, en 1990, *Tetrahymena* necesita telomerasa para mantener esa inmortalidad. Cuando se degrada la enzima, los telómeros se acortan y las células mueren. El equipo de Blackburn y otros han demostrado también que, en levaduras, las células que carecen de telomerasa acortan la longitud de sus telómeros y mueren. ¿Qué papel desempeña la telomerasa en el cuerpo humano, formado por multitud de tipos celulares y mucho más complejo que *Tetrahymena* o las levaduras?

Sorprendentemente, muchas células humanas carecen de telomerasa. Greider y otros descubrieron ese fenómeno a finales de los años ochenta, tras poner en orden unas investigaciones realizadas en Filadelfia hacía más de un cuarto de siglo. Antes de los años sesenta, se pensaba que las células humanas que se replicaban en el cuerpo estaban capacitadas para dividirse indefinidamente. Pero Leonard Hayflick y sus colaboradores, del Instituto Wistar, demostraron con nitidez que se trataba de una idea incorrecta. Hoy se sabe que las células somáticas (las que no forman la línea germinal) procedentes de recién nacidos suelen dividirse unas 80 o 90 veces en cultivo, mientras que las de una persona de 70 años sólo se dividen de 20 a 30 veces. Cuando las células humanas detienen su reproducción —o, en palabras de Hayflick, se tornan "senescentes"— adquieren un aspecto diferente y funcionan con menos eficacia que

cuando son jóvenes. Después de cierto tiempo, mueren.

En los años setenta, A. M. Olovnikov, de la Unión Soviética, relacionó ese cese programado de la división celular con el problema de la replicación de los extremos. Propuso que las células somáticas humanas eran incapaces de corregir el acortamiento cromosómico que se producía cuando las células replicaban su ADN. Probablemente, la división cesaba cuando las células se percataban de que sus cromosomas se habían acortado demasiado.

No nos enteramos de los trabajos de Olovnikov hasta 1988, cuando Calvin B. Harley, a la sazón en la Universidad McMaster, atrajo la atención de Greider hacia ellos. Intrigados, Greider y Harley decidieron comprobar si en las células humanas los cromosomas se acortaban con el paso del tiempo.

Se acortaban. La mayoría de las células somáticas normales que examinaron perdían segmentos de sus telómeros a medida que se dividían en el cultivo, señal ésta de que la telomerasa no era activa. De la misma manera, ellos y el grupo de Nicholas D. Hastie, del Consejo de Investigaciones Sanitarias (MRC) de Edimburgo, encontraron que los telómeros de algunos tejidos humanos normales se acortaban conforme la gente envejecía. (Un hecho tranquilizador, según observó Howard J. Cooke era que los telómeros se mantenían intactos en la línea germinal.) Estos resultados sugerían que las células humanas podían "contar" divisiones siguiendo el número de repeticiones teloméricas que perdían, y detenían su división cuando los telómeros alcanzaban una longitud crítica. Pero la prueba definitiva que lo corroborase no se había obtenido todavía.

¿Podía el encogimiento de los telómeros y la merma de capacidad proliferativa a lo largo del tiempo ser una causa del envejecimiento humano? Probablemente no es la causa principal. Las células humanas tienen un potencial de división mayor del que necesitan a lo largo de una vida. No obstante, el funcionamiento de un cuerpo más viejo puede verse a veces comprometido por el envejecimiento de un subgrupo de células. Por ejemplo, una herida puede cicatrizar mal si en el sitio donde se ha producido el daño se reduce el número de células capaces de formar piel nueva. De la misma manera, una merma de cierto tipo de leucocitos podría contribuir a fallos inmunitarios relacionados con la edad. Además, se sabe que la aterosclerosis se desarrolla allí donde las paredes de los vasos sanguíneos han sufrido daños. Cabe la posibilidad de que las células de los sitios repetidamente dañados terminen por "agotar" su capacidad replicativa, de suerte que las venas sean incapaces de reemplazar las células perdidas. En esas condiciones, el daño persiste y se acaba desarrollando la aterosclerosis.

Algunos sospechan que la pérdida de capacidad proliferativa observada en las células humanas que carecen de telomerasa puede ser un hecho privilegiado por la evolución, en el sentido de que no nos hace más decrépitos sino que nos ayuda a evitar el cáncer. Los cánceres surgen cuando una célula acumula muchas mutaciones genéticas que, en conjunto, provocan que la célula escape de los controles normales sobre la replicación y los movimientos migratorios. Cuando las células y sus descendientes se multiplican sin control, pueden invadir los tejidos vecinos y dañarlos. Algunas pueden también escapar y viajar hasta zonas del organismo que no les corresponde, estableciendo nuevos focos malignos (metástasis) en sitios distantes. En teoría, la falta de telomerasa retardaría el crecimiento de los tumores, al hacer que las células que se dividen sin cesar pierdan sus telómeros y mueran antes de que produzcan más daño. Si las células cancerosas fabricasen telomerasa, retendrían sus telómeros y, en principio, podrían sobrevivir indefinidamente.

La posiblidad de que la telomerasa ejerza una función importante en el mantenimiento de los cánceres humanos fue ya objeto de debate en 1990. Pero los indicios no han adquirido peso suficiente hasta hace muy poco tiempo. En 1994, Christopher M. Counter, Silvia Bacchetti, Harley y sus colegas de McMaster demostraron que la telomerasa se mostraba activa no sólo en las líneas de células cancerosas mantenidas en el laboratorio, sino también en tumores de ovarios *in vivo*. Posteriormente, grupos dirigidos por Harley, que se había trasladado a la Geron Corporation, en Menlo Park, y por Jerry W. Shay, del hospital clínico de la Universidad del Suroeste de Texas en Dallas, detectaron telomerasa en 90 muestras de tumores humanos, de las 101 analizadas (que representaban 12 tipos distintos de tumores) y no la detectaron en ninguna de las 50 muestras analizadas de tejido somático normal (de cuatro tipos distintos de tejidos).

Sin embargo, antes incluso de que se obtuvieran esas pruebas, se había comenzado a explorar algunos de los detalles de la relación entre telomerasa y cáncer. Esos trabajos sugerían que, probablemente, la telomerasa se activaba cuando la célula había iniciado su proliferación, una vez rotos los frenos normales que se lo impedían.

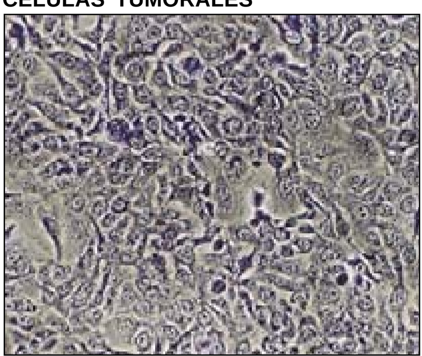
La primera pista fue el descubrimiento, inicialmente desconcertante, que realizaron por separado Titia de Lange, hoy en la Universidad Rockefeller, y el grupo de Hastie. En 1990, comunicaron que en los tumores humanos los telómeros eran más cortos que los telómeros del tejido normal circundante.

CELULAS JOVENES

CELULAS SENESCENTES



CELULAS TUMORALES



3. MODELO DE REGULACION de la longitud de los telómeros en humanos. Sugiere que las células de la línea germinal (*líneas azules en la gráfica de la izquierda*) sintetizan telomerasa y mantienen los telómeros con un tamaño grande. Por su parte, muchas células somáticas, no germinales (*color dorado oscuro en la curva*), carecen presumiblemente de telomerasa; en consecuencia, los telómeros se van acortando poco a poco. Andando el tiempo, muchas células somáticas entran en un estado de senescencia: detienen su división y sufren otros cambios. Sin embargo, algunas células aberrantes (*color dorado claro en la curva*) continúan dividiéndose. Muchas de éstas perderán repeticiones teloméricas hasta que alcanzan un punto crítico y mueren. Pero si alguna de tales células aberrantes comienza a fabricar telomerasa, se replica indefinidamente (*trazo verde de la curva*). Esta propiedad, que se encuentra en muchas células tumorales, se denomina inmortalidad celular. Las micrografías de la parte superior muestran células somáticas jóvenes (*izquierda*), senescentes (*centro*) y células tumorales inmortales (*derecha*).

Estudios realizados por los laboratorios de Greider, Bacchetti y Harley explicaban por qué los telómeros eran tan cortos. Promovieron la síntesis, por células humanas normales, de cierta proteína vírica que hacía que las células ignorasen las señales de alarma que suelen indicarles la suspensión de la división. Las células tratadas continuaban proliferando mucho tiempo después de que, en teoría, hubiesen entrado en la etapa de senescencia. En la mayoría de las células, los telómeros se acortaban drásticamente, y no se detectaba telomerasa. Con el tiempo, acababan muriendo. Algunas células, sin embargo, sobrevivían y devenían inmortales. En éstas, los telómeros se mantenían con una longitud llamativamente corta, a pesar de que presentaban telomerasa.

De tales resultados se infería que los telómeros de las células cancerosas eran menores porque las células sintetizan telomerasa sólo cuando han empezado ya a replicarse sin control. Para entonces, las células han perdido presumiblemente un número importante de subunidades teloméricas. Cuando la enzima se activa, estabiliza esos telómeros cortos y hace que las células prolíficas se vuelvan inmortales.

Estos y otros descubrimientos condujeron a un modelo, tan atractivo cuan hipotético, sobre la activación de la telomerasa en humanos, en los estados normal y maligno. Según ese modelo, las células de la línea germinal sintetizan de modo rutinario la telomerasa durante el desarrollo embrionario. Una vez que el cuerpo está totalmente formado, la telomerasa queda bloqueada en muchas células somáticas, y los telómeros se van acortando a medida que tales células se reproducen. Cuando el tamaño de los telómeros alcanza cierto umbral, se emite una señal que impide que las células sigan dividiéndose.

Sin embargo, si las mutaciones genéticas que promueven el cáncer obstaculizan la emisión de esas señales de seguridad, o dejan que las células las ignoren, las células continúan dividiéndose, obviando la senescencia. Presumiblemente, continuarán también perdiendo secuencias teloméricas y sufrirán alteraciones cromosómicas que harán que surjan nuevas mutaciones, tal vez carcinogénicas. Cuando los telómeros se han reducido a la mínima expresión, las células mueren.

Ahora bien, si como consecuencia de los trastornos genéticos del período de precrisis se vuelve a fabricar telomerasa, las células no perderán completamente sus telómeros, sino que se salvarán y mantendrán su tamaño. De esa manera, las células alteradas genéticamente adquieren las características inmortales del cáncer.

Aunque, en general, los resultados experimentales apoyan esta visión del proceso, de nuevo las cosas puede que no sean como parecen. Algunos tumores avanzados carecen de telomerasa y ciertas células somáticas, así macrófagos y linfocitos, sintetizan la enzima, como se ha comprobado hace poco. Mas, en conjunto, los indicios sugieren que muchas células cancerosas necesitan la telomerasa para dividirse indefinidamente.

La presencia de telomerasa en diversos tipos de cánceres humanos y su ausencia en muchas células normales significa que la enzima puede ser un buen blanco de drogas anticáncer. Los agentes capaces de obstaculizar la telomerasa podrían matar a las células tumorales (haciendo que los telómeros desaparezcan) sin alterar el funcionamiento de muchas células normales. La mayoría de las terapias anticáncer actuales no sólo alteran las células malignas, sino también las normales. Suelen ser, pues, bastante tóxicas. Además, como se detecta telomerasa en muchos tipos de cáncer, tales agentes podrían intervenir contra tumores muy dispares.

Ante posibilidades tan apasionantes los laboratorios farmacéuticos no se han cruzado de brazos. Sin embargo, urge dar respuesta a varios interrogantes. Debe determinarse, por ejemplo, qué células normales (además de las ya identificadas) fabrican telomerasa, y qué importancia reviste la enzima para esas células. Si la telomerasa es allí crucial, las drogas que la bloqueen pueden resultar tóxicas y, por tanto, inaceptables. El hecho de que los telómeros sean ya más cortos en ciertas células tumorales puede, no obstante, obviar ese problema. Los agentes inhibidores de la telomerasa pueden provocar que las células cancerosas pierdan sus telómeros y mueran, antes de que las células normales, con telómeros mucho más largos, pierdan una cantidad de telómero lo suficientemente grande como para que sufran cualquier efecto adverso.

Debe demostrarse, asimismo, que la inhibición de la telomerasa destruye los tumores productores de dicha enzima. El pasado mes de septiembre, Harley, Greider y sus colaboradores revelaron que cierto agente inhibidor causaba el acortamiento de los telómeros en células tumorales cultivadas. Las células afectadas morían tras 25 ciclos de división celular. El grupo de Blackburn ha encontrado, sin embargo, que a veces las células compensan la pérdida de telomerasa. Mediante el proceso de recombinación, por el que un cromosoma obtiene ADN procedente de otro cromosoma, las células pueden "reparar" el acortamiento de ciertos telómeros. Si en los tumores humanos se produjese frecuentemente la activación de una ruta alternativa "recuperadora de telómeros", la terapia dirigida contra la telomerasa no serviría para nada.

Los estudios con animales ayudarán a resolver estos problemas. Contribuirán también a que sepamos si los inhibidores de las telomerasas podrán eliminar los tumores en organismos vivos y si lo harán con celeridad suficiente para evitar que los cánceres afecten a otros tejidos importantes.

Para desarrollar agentes que bloqueen la telomerasa en humanos, los investigadores deben también tener una idea más precisa del funcionamiento exacto de la enzima. ¿Cómo se une al ADN? ¿Cómo "decide" cuántas subunidades teloméricas debe añadir? En el núcleo, el ADN está cubierto con todo tipo de proteínas, incluidas algunas que se unen específicamente a los telómeros. ¿Qué papel desempeñan las proteínas que se unen a los telómeros en el control de la actividad de la telomerasa? ¿Interrumpiría la elongación de los telómeros una alteración de la actividad de dichas proteínas? En los próximos 10 años esperamos aprender muchas cosas acerca de las interacciones entre los tipos de moléculas que influyen en la longitud de los telómeros.

Las investigaciones sobre la regulación del tamaño de los telómeros podrían producir también beneficios más allá de nuevas terapias contra el cáncer. En diversas enfermedades, la terapia génica implica la extracción de células del paciente, la inserción del gen deseado y la reintroducción en el paciente de las células corregidas genéticamente. A menudo, sin embargo, las células extraídas proliferan mal en el laboratorio. Quizá la inserción de la telomerasa, sola o en combinación con otros factores, incrementara transitoriamente la capacidad replicativa, permitiendo así que se pudiesen reinsertar en el paciente cantidades mayores de células terapéuticas.

Mucho es lo que se ha avanzado en el conocimiento de los telómeros, desde que se identificó el ADN repetitivo de los extremos de los cromosomas de un habitante de las charcas. La elongación de los telómeros por la telomerasa, considerada en su inicio un mecanismo "astuto" mediante el cual algunos organismos unicelulares mantenían sus cromosomas, ha resultado ser, como siempre, algo distinto de lo que parecía. De hecho, la telomerasa es el principal medio con que cuentan las células nucleadas de la mayoría de los animales para proteger los extremos de sus cromosomas. Además, el estudio de ese proceso puede permitir el desarrollo de estrategias innovadoras en la lucha contra el cáncer.

A principios de los años ochenta, a nadie se le habría ocurrido que el estudio del mantenimiento de los cromosomas en *Tetrahymena* llevaría a identificar posibles terapias contra el cáncer. Las investigaciones sobre la telomerasa nos recuerdan que, en la aproximación científica a la naturaleza, nunca puede predecirse cuándo y dónde se descubrirán procesos fundamentales. Nunca sabes en qué momento te darás cuenta de que una roca es en realidad una piedra preciosa.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IDENTIFICATION OF A SPECIFIC TELOMERE TERMINAL TRANSFERASE ACTIVITY IN *TETRAHYMENA* EXTRACTS. Carol W. Greider y Elizabeth H. Blackburn en *Cell*, vol. 43, parte 1, págs. 405-413, diciembre 1985.

IN VIVO ALTERATION OF TELOMERE SEQUENCES AND SENESCENCE CAUSED BY MUTATED *TETRAHYMENA* TELOMERASE RNAS. G.-L. Yu, J. D. Bradley, L. D. Attardi y E. H. Blackburn en *Nature*, vol. 344, págs. 126-132, 8 de marzo de 1990.

TELOMERASE, CELL IMMORTALITY AND CANCER. C. B. Harley, N. W. Kim, K. R. Prowse, S. L. Weinrich, K. S. Hirsch, M. D. West, S. Bacchetti, H. W. Hirte, C. W. Greider, W. E. Wright y J. W. Shay en *Cold Spring Harbor Symposia in Quantitative Biology*, vol. LVIX, págs. 307-315, 1994.

TELOMERES. Dirigido por E. H. Blackburn y C. W. Greider. Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1995.

Tim Beardsley

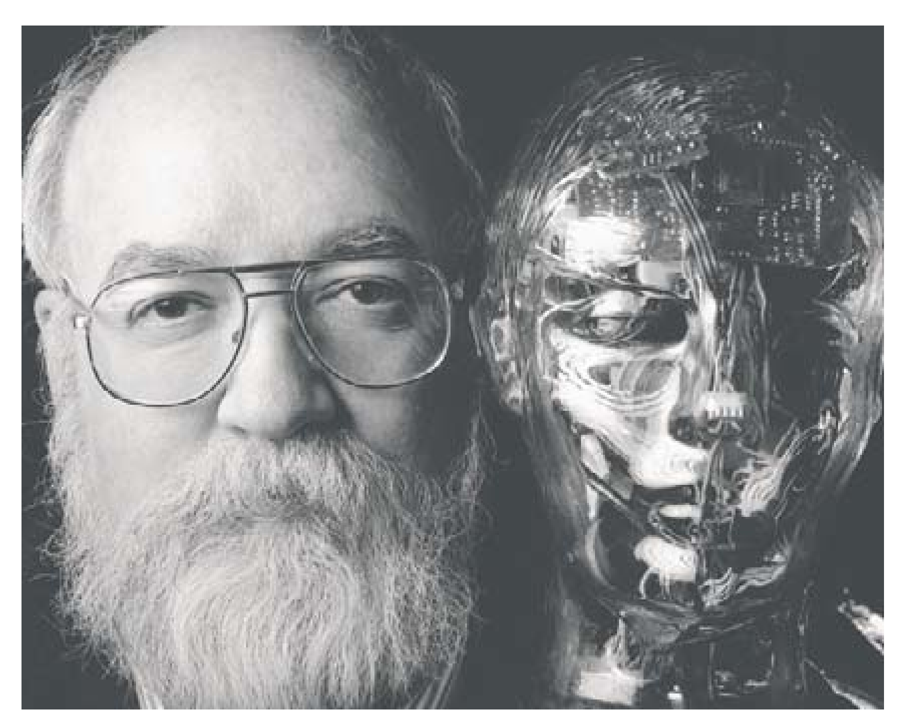
DANIEL C. DENNETT: *A vueltas con la consciencia*

El efecto es desconcertante. Estoy contemplando una escena cotidiana que parpadea en la pantalla de vídeo varias veces por segundo. Dos imágenes idénticas, salvo en un detalle, se van alternando rápidamente. He de discernir ese rasgo.

Parece inexplicable, pero no puedo ver lo que tengo a la vista durante 10, 20 e incluso 30 segundos. Cuando las escamas caen finalmente de mis ojos, la chimenea que cambia de un lado al otro del tejado resulta tan obvia que parece cómico. Lo mismo ocurre con una larga serie de parejas de imágenes. Me siento humillado, pero Daniel C. Dennett, que me ha engatusado para que me someta a esta adivinanza perceptiva, está exultante. El efecto lo descubrió recientemente Ronald A. Rensink, de Cambridge.

Mi miserable actuación es en realidad lo normal en esta prueba. Y según Dennett, un filósofo de la Universidad Tufts que profesa algunas ideas singulares sobre la mente, el lío sensorial que provoca el parpadeo de las imágenes revela mucho sobre la consciencia. En particular, nuestra firme impresión subjetiva de que somos conscientes de las percepciones sensoriales en tiempo real es pura ilusión. "No adquirimos el mundo de un golpe de vista y nos quedamos con la copia para compararla con la siguiente imagen. Sólo tomamos una muy limitada cantidad de material, y eso es todo lo que retenemos", explica.

Los filósofos cayeron en la cuenta hace tiempo de que las cosas no son lo que parecen. Dennett ha puesto el límite un poco más allá: nuestras ilusiones no son lo que parecen, porque están hechas de otras ilusiones. Con este trabalenguas mental afirma haber llegado a la almendra de la consciencia, que él considera producto de una "máquina virtual" manejada por el cerebro.



DANIEL C. DENNETT afirma que la consciencia la crea una "máquina virtual" manejada por el cerebro

A partir de observaciones psicofísicas como las de Rensink, la teoría de Dennett ha dividido a los pensadores en lo que concierne a la mente. Del libro que publicó en 1991 con el pomposo título de *Consciouosness Explained* se han vendido 100.000 ejemplares, una cifra sin precedentes para un tratado filosófico. El año pasado, publicó un manifiesto, *Darwin´s Dangerous Idea*, que pretendía dejar sentado que la selección natural es "la mejor idea que nadie haya tenido jamás". Y ahora participa como consejero en la construcción de un robot en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, un robot que "será consciente si conseguimos hacer todas las cosas que están puestas en el plan de trabajo".

Desmitificar la mente ha sido el caballo de batalla de su campaña por poner al día la filosofía a la vista de los avances en biología. Dennett dejó de lado sus pretensiones de hacerse escultor profesional para estudiar filosofía en la Universidad de Oxford en los años sesenta, pero la supuesta edad de oro de esa disciplina estaba ya en decadencia. "Me volvía loco: íbamos soltando cosas sobre la mente sin saber nada de nada sobre el cerebro", recuerda. Se veía a sí mismo "cada vez más como un extraño", pero Gilbert Ryle, una figura preeminente de la escuela materialista, alentó el interés de Dennett por la psicología. Hoy algunos filósofos hubieran deseado que Ryle no fuera tan solícito.

Los materialistas, Dennett lo es, piensan que la consciencia y la voluntad son eso, materia, moldeada por la evolución para realizar cosas útiles. Pero Dennett percibe una honda reticencia, entre prominentes intelectuales, ante semejante aserto. Y cree que esa renuencia obedece a "temores de que la respuesta 'equivocada' pudiera tener implicaciones morales inaceptables". El cree que esos temores se basan en la ignorancia.

En su libro *Elbow Room* exploraba el eterno enigma de si el hombre posee una voluntad libre. Afirma rotundo que sí. Nuestras deliberaciones forman parte del "nexo crítico" que nos lleva a una determinada acción, así que es nuestro el poder de decidir, incluso aunque el universo siga dictados deterministas. "El principal problema que se opone a la libre voluntad es político", declara Dennett.

La idea más peligrosa de Dennett es que la clave para entender el comportamiento, humano o no, es adoptar la "postura intencional". Al igual que la mejor manera de predecir la siguiente jugada de un ordenador, programado para jugar al ajedrez, es pensar que "quiere" ganar, antes que estudiar toda su circuitería electrónica, así la mejor manera de predecir el comportamiento de un animal es suponer que tiene sus creencias y deseos. Dennett considera las creencias como propiedades virtuales de los cerebros similares a los programas de ordenador.

En la vida cotidiana, asumimos inconscientemente la actitud intencional cuando tratamos con la gente. El movimiento conductista, sin embargo, había intentado erradicar del léxico científico términos como deseo y expectativa. La postura intencional no niega las explicaciones del comportamiento basadas en la actividad de las células nerviosas. Pero Dennett dice que su enfoque ha estimulado el trabajo sobre el comportamiento animal y ha influido sustancialmente en la psicología del desarrollo infantil.

Aplicando la actitud intencional a los humanos llegó Dennett a su teoría de la consciencia. Ciertos experimentos psicofísicos muestran que, contrariamente a la intuición, el orden en el que las cosas se perciben no es el mismo que aquel con el que los datos sensoriales llegan al cerebro. Entre sus ejemplos favoritos cita lo que denomina fenómeno del color-fi. Si un experimentador dispone dos luces, una roja y una amarilla, de modo que se enciendan y apaguen alternativamente en rápida sucesión —con un breve intervalo temporal a oscuras entre ambas— el observador creerá ver una sola luz en movimiento que cambia de color de camino entre dos posiciones. Dennett acepta este informe de la experiencia consciente —ésa es la actitud intencional— aun cuando los sujetos piensen retrospectivamente que el color de la lámpara ilusoria que se mueve vaya cambiando antes de que la otra lámpara se encienda.

Para Dennett no se puede trazar una línea divisoria entre los datos sensoriales de los que la gente es consciente y de los que no. En realidad, no somos conscientes de nada en el preciso instante en que nos lo parece. Lo que experimentamos, aduce, se genera un poco después del hecho, como resultado de la competición entre múltiples patrones de actividad mental que se propagan en el interior del cerebro. Ser consciente comprende la pequeña fracción de esos sucesos mentales cuya influencia persistirá y, por tanto, alterará las creencias sobre lo que ha ocurrido. En el experimento del color-fi, los datos sobre el nuevo color se combinan con la falsa idea de una luz en movimiento y se remiten erróneamente hacia atrás en el tiempo.

La idea de que la consciencia sea en gran medida ilusión resulta indigesta para otros filósofos. Dennett se enzarzó en un debate con John R. Searle, de la Universidad de California en Berkeley. Searle insiste (a pesar de las protestas de Dennett) en que éste no entiende por consciencia lo mismo que los demás. En un número reciente de la *New York Review of Books*, Searle acusaba a Dennett de padecer una "patología intelectual". En respuesta, éste le tilda de "comediante egregio". Otros le son más favorables. Owen Flanagan, filósofo de la Universidad Duke, dice que la actitud intencional representa "una tremenda contribución".

Dennett piensa que el darwinismo, debidamente entendido, no posee "implicaciones morales insoportables"

Al igual que el comportamiento sólo tiene sentido con la actitud intencional, sostiene Dennett, la evolución sólo se comprende en el marco del adaptacionismo. ("De modo que nuestra intencionalidad —escribió en una ocasión— ¡deriva de la intencionalidad de nuestros genes 'egoístas'!") Esta idea, que las características de los organismos se puedan entender como soluciones por selección natural a los problemas evolutivos, no es nueva en absoluto, pero algunos biólogos habían sembrado dudas sobre su valía.

En *Darwin's Dangerous Idea* rompe una lanza en favor del adaptacionismo, al que recurre para explicar no sólo la vida orgánica sino también la cultura y otras perplejidades, como el significado y la moral. "Puede herir la sensibilidad", advierte. El libro es para "aquellos que están de acuerdo en que el único sentido de la vida por el que merece la pena preocuparse es el que pueda soportar nuestros mejores esfuerzos para ponerlo a prueba".

Dennett se toma a pecho que la idea de adaptacionismo no quede relegada a un segundo plano. Con esta noción reta al paleontólogo de Harvard Stephen Jay Gould. Dedica capítulos enteros a desmontar los argumentos de Gould y de Roger Penrose (el matemático de la Universidad de Oxford en cuyos libros se arguye que el pensamiento depende de efectos que tan sólo la física cuántica puede explicar). Dennett cree que ambos pensadores buscan desesperadamente "un gancho al que agarrarse", explicaciones de orden superior que parecerían conferir al ser humano una categoría especial.

El encuentra sentido en la propia evolución. Y pese a no ser hombre de iglesia, su reverencia por el darwinismo raya en el fervor religioso. El árbol de la vida no es algo a lo que él le pudiera rezar, declara, pero insiste en que "este mundo es sagrado". (También canta música sacra con los New England Classical Singers.) Y Dennett mantiene que la evolución puede dar forma a la moral. No comulga con la "falacia naturalista", que supone que las cosas deben ser en la sociedad tal como son en la naturaleza. Más aún, critica a los sociobiólogos, incluido Edward O. Wilson, por simplificar en demasía el comportamiento humano; los sociobiólogos olvidan "una y otra vez" que la gente puede pensar por sí misma y aprender de otros.

Dennett cree que la comprensión del poder creador de la selección natural puede resaltar la apreciación por sus productos únicos, como son la cultura y las especies en peligro de extinción y los seres humanos individuales. Esa clase de apreciación podría proporcionar la base de una nueva moral, sugiere. Por contra, le parece que los principios éticos absolutos pueden generar conflictos entre normativas que compiten.

Llevamos ya varias horas hablando sobre los libros y las imágenes de Rensink. Pero quiero saber qué piensa sobre las grandes cuestiones de la metafísica y la moral: cómo hallar la felicidad y distinguir el bien del mal. Para hallar la felicidad, responde que hay que encontrar un proyecto que sea "mayor que uno mismo". Y el absolutismo que se desborda en fanatismo es el mayor de los males a los que se enfrenta el mundo: "Hay un sentimiento creciente de desesperación y futilidad; hasta que encontremos una situación económica y política más justa, la gente va a estar fuertemente motivada por este tipo de comportamiento."

Ciencia y sociedad

Origen de las sociedades agrícolas

El proyecto de Tell Halula

El estudio de las primeras sociedades agrícola-ganaderas es uno de los temas que, en la corta historia de la arqueología, ha motivado mayor esfuerzo y dedicación. La investigación del por qué, el cómo y cuando se realizaron los primeros ensayos de domesticación de plantas y animales, así como el conocimiento de las sociedades que los llevaron a cabo, constituyen tareas necesarias a acometer por tratarse de la base socioeconómica sobre la que se asentará la evolución de las grandes civilizaciones históricas posteriores.

La zona del Próximo Oriente se nos ofrece como un marco privilegiado para dicho análisis, al constituir una de las pocas regiones del mundo donde la transformación se produce en fecha más temprana y como resultado de un proceso de evolución interna.

Un equipo de la división de prehistoria de la Universidad Autónoma de Barcelona desarrolla, bajo mi dirección, investigaciones en esta línea de trabajo desde los años ochenta. Nuestro actual proyecto, el asentamiento de Tell Halula, se enmarca en una operación internacional de salvamento del patrimonio amenazado por la construcción del pantano de Tchrine, en el valle del Eufrates, al norte de Siria. El proyecto está patrocinado por organismos oficiales españoles y sirios.

Las campañas realizadas desde 1989 han venido proporcionando valiosa documentación donde se reflejan las características de este antiguo poblado, muestra del dinamismo de las sociedades del Levante mediterráneo. En primer lugar, sobre su período de ocupación. Del trabajo analítico y de las series de dataciones radiométricas obtenidas se infiere que el asentamiento permaneció ocupado de manera ininterrumpida durante unos dos mil años: entre 8800 y 6800 años atrás. Posteriormente tuvo ocupaciones más esporádicas y de menor importancia.

Con unas ocho hectáreas de extensión, Tell Halula sobresalió como uno de los grandes poblados de la zona. Era un foco de atracción y desarrollo regional. Tras más de mil metros cuadrados de zona excavada, tenemos ya una idea bastante definida de la estructuración y uso del espacio. A pesar de pequeñas variaciones a lo largo de su evolución, las casas construidas en adobe y planta rectangular se distribuían de manera ordenada, próximas entre sí; en su interior los espacios de paso eran muy limitados en tanto que se abrían zonas exteriores extensas, donde se ejercían las actividades domésticas (preparación de alimentos) o artesanales (fabricación o reparación de útiles en sílex). La casa constaba de tres o más estancias, cada una con una función diferente.

En el asentamiento de Tell Halula hemos encontrados pruebas de una arquitectura monumental. Destacan, en particular, dos muros imponentes. El primero, de aterrazamiento y conservado en una altura superior a los 3,5 metros, se levantaría hace unos 8000 años. Sólo tendría paralelos conocidos en las famosas “murallas” de Jericó. Más reciente es el segundo, de hace unos 7800, que cercaría el







Excavación del gran muro de aterrazamiento, levantado hace unos 8000 años en Tell Halula (izquierda). *Sello de cerámica desenterrado en el yacimiento arqueológico* (derecha)

poblado. Las dos construcciones, en piedra seca, constituyen una de las pruebas más antiguas de Oriente de este tipo de construcciones.

En una primera fase, las producciones artesanales de Tell Halula se centran en el aprovechamiento del sílex para la fabricación de útiles y el basalto para la fabricación de molinos. Recurrían también a otros minerales, de procedencia más lejana, para tallar objetos de adorno personal (cuentas de collar y colgantes, por ejemplo). Con todo, la principal transformación artesanal reside en las primeras producciones alfareras, que se fechan en torno al 7900/7800 antes de la actualidad. Será esta innovación técnica uno de los capítulos más ambiciosos de nuestro proyecto de investigación. Contamos ya con datos suficientes que avalan la hipótesis de un comercio intenso, como el hallazgo de obsidiana, cuyos yacimientos primarios distaban de Tell Halula más de 500 kilómetros, así como betún, piedras y probablemente cerámica.

Por lo que concierne a las prácticas de subsistencia, los datos nos remiten a una época de cambio. Abundan los restos arqueológicos de una permanente dedicación a la agricultura y recolección de productos vegetales. Por otro lado, el estudio de los restos de explotación animal nos traza un cuadro de transformación progresiva desde la mera caza (de uros y gacelas sobre todo) en los inicios del poblado hacia la domesticación de cabras y ovejas, primero, y, más tarde, de bóvidos y cerdos, todo ello en un intervalo de 700/800 años desde la fundación del asentamiento. La documentación precisa de este proceso de cambio económico constituye otra de las aportaciones importantes del proyecto, al ser uno de los pocos yacimientos, por no decir único, que presenta dicha secuencia en la parte occidental del Próximo Oriente.

La aplicación de las nuevas técnicas (ADN recombinante y análisis de isótopos) a la restos humanos hallados en las sepulturas nos permitirán una aproximación a la caracterización de la población, su régimen alimentario, enfermedades, endogamia, etcétera. Investigación que completaremos con el estudio de las prácticas funerarias y otros documentos (estatuillas) y que nos podrán acercar al siempre difícil mundo simbólico-religioso del pasado.

MIQUEL MOLIST
Universidad Autónoma de Barcelona

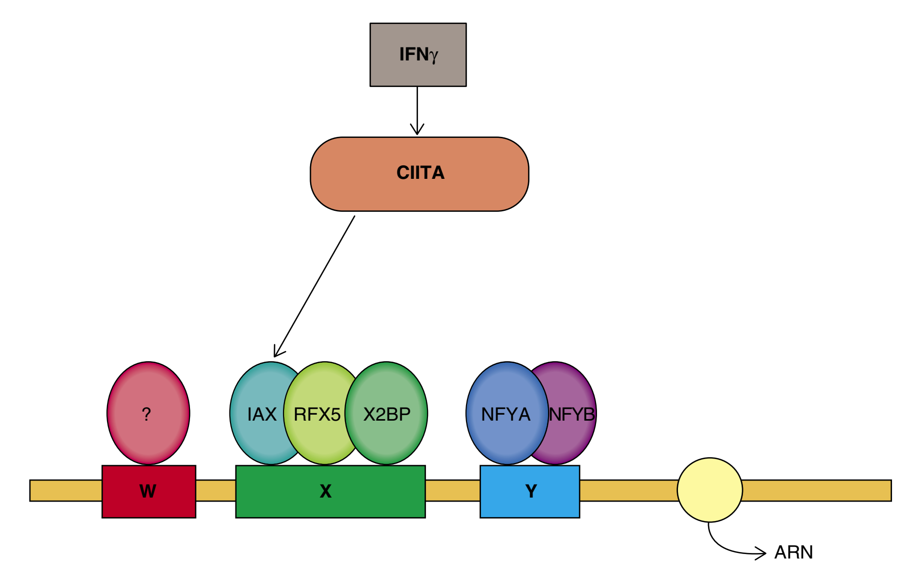
Respuesta inmunitaria

Función del MHC

El sistema inmunitario tiene como finalidad distinguir lo propio de lo ajeno y, una vez reconocido lo ajeno, eliminarlo. La mayoría de las sustancias extrañas, o antígenos, están compuestas por proteínas. Los microorganismos que llegan al organismo los captan una serie de células, denominadas presentadoras de antígeno, que desnaturalizan las proteínas en péptidos (fragmentos) de 15 a 20 aminoácidos y los presentan a los linfocitos *T* de subtipo CD4. Tras la interacción entre las células presentadoras y los linfocitos *T*, estos últimos se activan y dan lugar a la producción de citocinas, iniciándose así la respuesta inmunitaria con la posterior eliminación del agente extraño.

Las células presentadoras de antígeno (linfocitos *B*, macrófagos, células dendríticas, células endoteliales, etc.) incluyen los péptidos producidos en las moléculas del complejo principal de histocompatibilidad (MHC) de clase II. En linfocitos *B* y células dendríticas la expresión de estas moléculas es constitutiva, se hallan siempre presentes, mientras que en las otras células se requiere el tratamiento previo con interferón gamma (IFNγ). El péptido que está en forma lineal se instala en el surco de la molécula de clase II del MHC; el receptor de los linfocitos *T* reconocerá específicamente a ambos, péptido y molécula.

La propia respuesta inmunitaria frente a un antígeno proteico y la contundencia de la misma dependen, en definitiva, de la correcta interacción entre los receptores *T* de los linfocitos y las moléculas de clase II del MHC que contengan el péptido. Los receptores linfocíticos pueden reconocer prácticamente cualquier tipo de estructura (el número de especificidades se cifra en torno a 10^{16}). Sin embargo, el número de moléculas del MHC de clase II es limitado y, por tanto, condiciona la respuesta inmunitaria en un individuo determinado. El hecho de que el complejo principal de histocompatibilidad sea el sistema genético más polimórfico que se conoce, hace que se salve la especie; es decir, si frente a una epidemia una serie de individuos no producen una respuesta inmunitaria y fallecen, habrá otros individuos con el complejo principal de histocompatibilidad apropiado para dar una respuesta inmunitaria y sobrevivir.



Representación de la región promotora (reguladora) de los genes de clase II del complejo principal de histocompatibilidad (MHC). En la parte reguladora de estos genes existen tres secuencias conservadas que se denominan cajas W, X e Y. Sobre estas cajas se unen unas proteínas, factores de transcripción, que, tras interaccionar con la polimerasa II, inician la transcripción. En los pacientes con el síndrome del linfocito pelado no se expresan las moléculas de clase II del MHC y sufren en consecuencia una inmunodeficiencia severa combinada. En un grupo de pacientes falta la proteína RFX5 y en otro grupo la IAX. El interferón gamma (IFNγ) induce en algunas células, como son los macrófagos, la expresión de proteínas de clase II del MHC. Esta inducción viene mediada por la expresión de una proteína, CIITA, que no se une al ADN y que está ausente en un tercer grupo de pacientes. Esta proteína CIITA es la que induce la expresión a su vez de IAX, necesaria para la transcripción del gen

Compete también a las moléculas de clase II del MHC educar a los linfocitos *T*. Estas células se producen en la médula ósea y van al timo, donde proliferan y maduran. Parte del proceso de maduración lo invierten en el desarrollo del receptor de los linfocitos *T*; mediante reorganización génica al azar, durante la maduración se producirán linfocitos capaces de reconocer cualquier tipo de molécula. Como al organismo sólo le interesan los linfocitos que reconozcan sus propias moléculas del MCH, los que no las reconozcan se desecharán, por inservibles, en un proceso de selección positiva. La educación de los linfocitos *T* se ordena hacia la selección negativa, donde se eliminan los linfocitos que reconozcan las propias estructuras (reconocimiento de la propia identidad).

La ausencia congénita de moléculas de clase II del MHC produce un síndrome de inmunodeficiencia severa combinada. Las respuestas de los linfocitos *T* y *B* son entonces deficitarias; se deja así vía abierta a las infecciones oportunísticas (por gérmenes benignos), diarrea crónica, infecciones víricas recurrentes, candidiasis, etc. De hecho, al no haber en el timo moléculas de clase II los linfocitos *T* no pueden interaccionar con el propio MHC y se eliminan. En consecuencia, los pacientes sufren una linfopenia *T*. Conocida antaño esta enfermedad por síndrome del linfocito pelado (*Bare lymphocyte*), en la última clasificación de la OMS de las inmunodeficiencias se la ha denominado síndrome por carencia de moléculas del MHC. La enfermedad demuestra la importancia de las moléculas de clase II en la respuesta inmunitaria.

Se han producido líneas celulares a partir de los linfocitos de estos sujetos, que no expresan moléculas de clase II del MHC. Mediante la fabricación de células híbridas (complementación) se ha demostrado la existencia de cuatro defectos distintos. Curiosamente ninguno de los cuatro se debe a mutaciones o deleciones de las regiones codificantes de estas moléculas. Los defectos se encuentran en la región reguladora de los genes que expresan las moléculas de clase II del complejo principal de histocompatibilidad.

En la región reguladora, o promotor, de todos los genes de clase II se han identificado tres secuencias que persisten a lo largo de la evolución: se las denomina cajas Y, X y W, y en los humanos corresponden a los genes *DR*α y *DR*β, *DP*α y *DP*β y *DQ*α y *DQ*β. Las secuencias de las cajas aparecen en el promotor de los genes de clase II en todas las especies estudiadas hasta hoy (ratón, rata, perro, vaca, etc.) y se encuentran separadas por unos 20 pares de bases. Tal regularidad sugiere una misma orientación en relación a los giros del ADN; y, dada su proximidad, las proteínas o factores de transcripción podrían interaccionar entre sí.

Mediante ensayos funcionales y deleciones o mutaciones se ha podido determinar que las tres cajas Y, X y W son necesarias para la expresión correcta de los genes de clase II del MHC. También se han identificado una serie de proteínas que se unen específicamente a todas estas cajas. Pero no se ha podido clonar todavía todas las proteínas que se unen a las cajas. A la caja Y se une el factor de transcripción NFY; esta proteína consta de dos componentes, NF-YA y NF-YB, que necesitan interaccionar entre sí para unirse eficazmente al ADN. El factor no es específico del promotor de las moléculas de clase II y regula muchos otros genes. Sobre la caja W se ha demostrado la presencia de un factor de transcripción que se une eficazmente, aunque aún no se ha clonado.

Donde existen mayores dificultades es en la caja X. Hasta el momento se ha publicado el clonaje de dos proteínas, ninguna de las cuales es inducible por interferón gamma (IFNγ), ni presenta especificidad de tejido. En la parte 3′ de la caja se une la proteína X2bp, que es muy similar, o idéntica, al producto del proto-oncogén *c-jun*. En la parte 5′ se une la proteína RFX5, que está ausente en uno de los grupos de pacientes con síndrome del linfocito pelado.

En otro grupo de pacientes falta la proteína CIITA, que no se une al ADN y que, por tanto, no es un factor de transcripción. Se desonoce el mecanismo de actuación de CIITA, pero es inducible por IFNγ y está presente en los tejidos que expresan moléculas de clase II del complejo principal de histocompatibilidad. Por último, una proteína de 36 kilodalton que se une a la parte mas extrema 5′ de la caja X está ausente en un tercer grupo de pacientes. Esta proteína podría corresponder al producto del gen *IAX* que hemos clonado recientemente y que como CTIIA es IFNγ inducible y tiene una expresión específica de tejido.

La existencia de estos pacientes contribuye poderosamente al estudio del promotor y regulación de la expresión de las moléculas de clase II del complejo principal de histocompatibilidad que desempeñan un papel crucial en la respuesta inmunitaria.

ANTONIO CELADA
Departamento de Inmunología.
Facultad de Biología
Universidad de Barcelona

Astronomía

¿Cuánto pesa el universo?

Una imagen vale más que mil palabras, se dice. Nunca mejor aplicado cuando se trata de explicar la silenciosa reacción de los astrónomos ante los primeros resultados del telescopio Keck, el mayor telescopio óptico jamás construido. Keck no puede igualar la nitidez de las imágenes que envía el *Telescopio Espacial Hubble*. Pero le gana en capacidad, notabilísima, de captación de luz, un regalo para el estudio de los espectros de los objetos más débiles y distantes. Lo que pasa es que "cuesta vender un espectro, por mucho que lo pongas con bonitos colores", comenta Lennox L. Cowie, del Instituto de Astronomía de Honolulú.

Desde que en 1993 empezó a funcionar a pleno rendimiento, en las alturas de la cima del Mauna Kea en Hawai, el Keck ha venido revolucionando la comunidad astronómica. Su enorme espejo segmentado —diez metros de diámetro— acelera el proceso de explorar las regiones remotas y, por tanto, más jóvenes del cosmos. "Su rapidez te deja asombrado", se maravilla David Tytler, de la Universidad de California en San Diego. Tytler, Cowie y varios colaboradores aprovechan los talentos del Keck para afrontar cuestiones básicas acerca de la formación y evolución de las galaxias y de la cantidad de materia ordinaria existente en el universo, a menudo con resultados inesperados.

Una manera de pesar el universo consiste en mirar cuál es la concentración de hidrógeno pesado, o deuterio, en objetos muy jóvenes que no estaban contaminados todavía por los productos nucleares secundarios de las estrellas. El modelo de la gran explosión predice que la cantidad de ese deuterio primordial depende de la densidad total de la materia normal, o bariónica, la que compone las estrellas y las nubes de gas.

Cuando Tytler utilizó el Keck para buscar el deuterio, encontró una señal espectroscópica sorprendentemente tenue. De sus resultados se desprende que la densidad bariónica del universo es mucho mayor que la esperada. Pero las galaxias observadas y la materia intergaláctica explican sólo una fracción pequeña de esa densidad. ¿Era posible que se estuviera pasando por alto un 80 por ciento, como poco, de toda la materia normal del uni-

verso? “Los astrónomos, se objeta Tytler, tendrían que haber podido ver un gas ordinario.”

Entonces, ¿dónde está la materia que falta? El sospecha que la respuesta se esconde en otro conjunto de datos obtenidos por el telescopio, que parece mostrar que el espacio entre las galaxias está lleno de nubes de gas caliente, casi invisible. Esos insustanciales velos intergalácticos podrían pesar más que todas las estrellas y galaxias, tan notorias.

Cowie y Antoinette Songaila, también del Instituto de Astronomía, han llegado a una conclusión diferente, a partir de observaciones hechas con el telescopio Keck. Basándose en los mismos principios, aunque con técnicas de observación diferentes, los dos hallaron sólo un décimo de la cantidad de deuterio medida por Tytler, lo que sugiere que no hace falta buscar una materia bariónica “perdida”. Estas discrepancias no son insólitas cuando se ensayan distintos métodos con un instrumento nuevo. Tytler y Cowie confían en que el Keck zanje la cuestión en los próximos años.



El telescopio Keck, instalado en la cima del Mauna Kea en Hawai, en una exposición de siete horas

En otro estudio apasionante, Cowie y sus colegas hallaron trazas de carbono en el espectro de nubes de gas muy distantes. En su opinión, todo el carbono del universo, a diferencia del deuterio, se ha creado en las estrellas. Debería, por tanto, servir de indicador de la formación de estrellas. A Cowie le sorprendió hallar ese elemento en unas nubes jóvenes de las que se piensa que son muestras primigenias de la gran explosión originaria (“big bang”).

Cowie se inclina por un modelo defendido por Jeremiah P. Ostriker, de la Universidad de Princeton, según el cual las inestabilidades que surgieron tras la gran explosión podrían haber desencadenado la formación de estrellas antes de que se constituyesen las primeras galaxias. Tytler prefiere una interpretación más sencilla: el carbono se creó en estrellas pertenecientes a galaxias infantiles, pero luego fue expelido hacia el espacio intergaláctico.

Si se pudiesen observar las galaxias más jóvenes, recién nacidas, avanzaríamos mucho en el conocimiento de los procesos evolutivos que vinculan la gran explosión con la moderna Vía Láctea. También aquí está el Keck aportando resultados apasionantes, aunque duros de entender. S. George Djorgovski, del Instituto de Tecnología de California, se ha pasado años intentando desentrañar el proceso de nacimiento de las galaxias. Sus últimas observaciones muestran muchas de las galaxias más débiles que jamás se hayan visto, pero aún no hay señal de las esperadas protogalaxias.

El universo es muy extraño. Quizá las galaxias infantiles estén cubiertas por un polvo que las oscurece, o quizás haya que usar un método distinto para verlas. Djorgovski es óptimista en lo que se refiere a que el Keck ofrezca algunas respuestas.

Los primeros pasos del Keck no han estado del todo libres de contratiempos. Los ajustes de los ingenieros todavía se comen una buena cantidad del tiempo mientras los operarios aprenden las sutilezas del inusual diseño. A nadie parece molestarle la poca atención pública que ha merecido el telescopio. Cowie piensa que el Keck “funciona con la mentalidad clásica del Caltech”: se alienta a los investigadores a que estudien de cabo a rabo los problemas antes de publicar nada. Lo que no es mala divisa para los tiempos que corren.

COREY S. POWELL

Biología del desarrollo

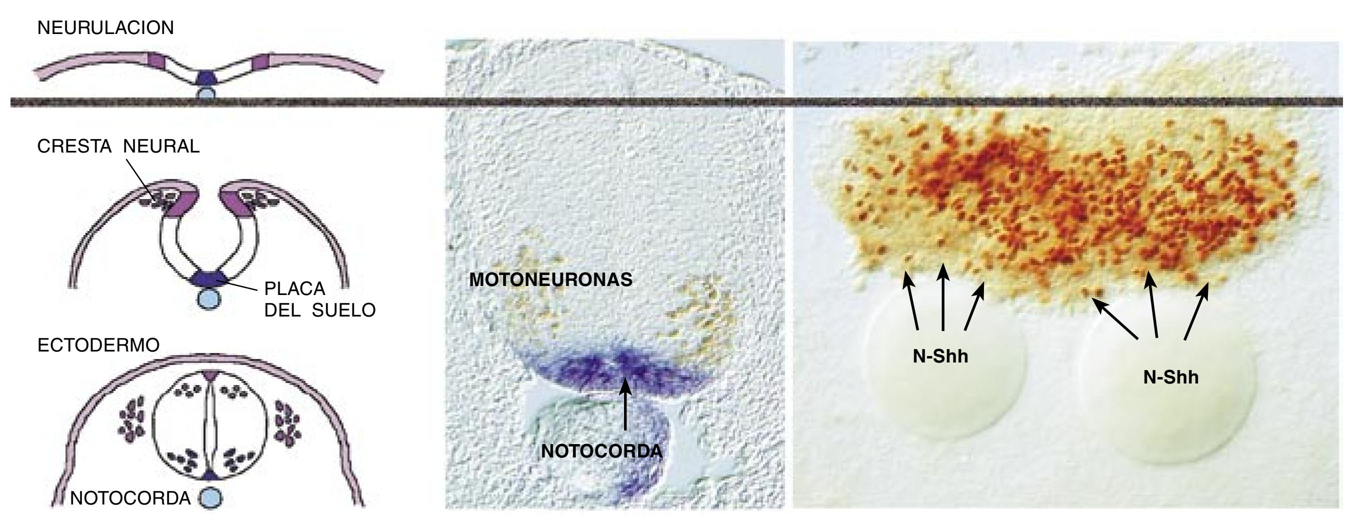
Establecimiento del patrón dorso-ventral en el sistema nervioso

La médula espinal y tronco encefálico de los vertebrados son estructuras con simetría bilateral. En médula y tronco, las líneas media ventral y dorsal están ocupadas por conjuntos celulares que reciben la denominación respectiva de placa del suelo y placa del techo.

Entre las dos últimas estructuras mencionadas se van formando, por diferenciación celular, las motoneuronas (ventralmente y cerca de la placa del suelo), las células de la cresta neural y las neuronas comisurales (dorsalmente y cerca de la placa del techo). En posición ventral al tubo neural se sitúa la notocorda, una estructura derivada del mesodermo.

El proceso de desarrollo que experimentan estas poblaciones celulares y el modo en que terminan por establecer sus posiciones finales en el sistema nervioso central han constituido uno de los mayores misterios de la biología.

Durante el desarrollo embrionario, los organismos recurren a la inducción para especificar los distintos tipos celulares. Mediante la inducción, una señal producida por una



El gen inductor Sonic hedgehog *se expresa en la notocorda y placa del suelo y promueve la diferenciación de motoneuronas. Se trata del primer morfógeno conocido.*

región del embrión influye en la diferenciación de las células adyacentes. En principio, esta inducción puede llevarse a cabo a través de una "señal de larga distancia", que promoverá la diferenciación de distintos linajes celulares en respuesta al gradiente de concentración que las células diana vayan recibiendo. Las moléculas que actúan según este mecanismo reciben el nombre de morfógenos. Pero la señal inductora puede ser también local, e iniciar ésta, a su vez, una cascada de otras "señales de corta distancia" que se propagarán localmente entre células adyacentes.

Hace unos años, cuando empezó a experimentarse con la ablación y el trasplante de notocorda, afloraron los primeros datos de interés sobre los mecanismos de desarrollo del sistema nervioso. La ablación de la notocorda resulta en la pérdida de la placa del suelo y de motoneuronas y produce, además, la expansión de genes de expresión dorsal hacia zonas ventrales. Por su lado, el transplante de un fragmento extra de notocorda a zonas dorsales adyacentes al tubo neural origina una placa del suelo ectópica y poblaciones supernumerarias de motoneuronas.

Veíase, pues, que en la notocorda residía la fuente de una señal o señales que inducían la formación de estructuras ventrales. Se ignoraba el proceso mediante el cual se realizaba dicha inducción. ¿Produce la notocorda una señal de larga distancia, capaz de afectar a todo el tubo neural? ¿Produce, por contra, una señal de corta distancia que induce la diferenciación de la placa del suelo, y ésta a su vez emite otra señal capaz de inducir la diferenciación de motoneuronas? Ninguno de esto modelos aclara el problema de la diferenciación de los tipos celulares dorsales, las células de la cresta neural y las neuronas comisurales. ¿Se desarrollan estos tipos celulares mediante un mecanismo pasivo (es decir, sin la diferenciación de tipos ventrales)? ¿O acaso requieren también la actividad de señales inductoras dorsalizantes provenientes de otro tejido que no sea el nervioso?

Una serie de experimentos *in vitro* ha aportado algunas respuestas. En tales ensayos se ha utilizado un fragmento de tejido nervioso que, en una etapa ulterior del desarrollo, originará la zona intermedia del tubo neural. Pequeños segmentos extraídos de esta zona intermedia del tubo neural logran sobrevivir en cultivo y formar neuronas por sí solos, pero nunca originan células de la cresta neural, típicas de zonas dorsales del tubo, ni tampoco motoneuronas, típicas de zonas ventrales.

Los equipos dirigidos por Thomas Jessell y Jane Dodd, de la Universidad de Columbia, han demostrado que, cultivando segmentos del tubo neural intermedio en contacto con fragmentos de notocorda, aumenta el número de células que expresan marcadores ventrales, lo que significa el desarrollo de motoneuronas en el tejido neural de procedencia intermedia. Otros experimentos similares han comprobado que la notocorda y placa del suelo producen señales capaces de inducir la diferenciación de células de la placa del suelo, además de motoneuronas, en este tipo de co-cultivo. Pero si la placa del suelo es capaz de inducir la formación de más placa del suelo, ¿qué es lo que impide que todo el tubo neural termine formando este tipo celular?

En ensayos realizados en el laboratorio de Andrew McMahon, de la Universidad de Harvard, se ha demostrado que la interacción entre el ectodermo dorsal y tejido neural de procedencia intermedia aumentaba la expresión de marcadores dorsales, así como la diferenciación de células de la cresta neural.

A partir de todos los resultados precedentes, podemos elaborar un modelo de desarrollo del sistema nervioso central. En ese marco, la notocorda sería responsable de la diferenciación de células con características ventrales, mientras que el ectodermo dorsal sería responsable de la diferenciación de tipos celulares dorsales y de células de la cresta neural. El establecimiento de la polaridad dorso-ventral del tubo neural se debería a señales inductoras "ventralizantes" que proceden de la notocorda y a señales "dorsalizantes" que provienen del ectodermo dorsal. Modelo en el que encuentra encaje la tesis de que las células de la zona intermedia se diferencian en respuesta a la carencia o baja concentración de señales inductoras. ¿Cuál es la naturaleza molecular de tales señales?

El patrón de expresión de los factores inductores conocidos no permitía relacionar a ninguno de ellos con el desarrollo del sistema nervioso. Pero recientemente tres laboratorios han descubierto, a la vez, una nueva familia de genes inductores homólogos al gen *hedgehod* de *Drosophila*. De ellos, el gen *Sonic hedgehog* (*Shh*) se expresa en la notocorda y placa del suelo, además de en otros centros inductores. Contamos, pues, ya con una molécula que se expresa en el sitio

adecuado y en el momento oportuno para actuar como morfógeno del sistema nervioso. La proteína *Shh* genera dos péptidos; un amino-terminal (N-Shh), de 19 kilodaltons, y un carboxi-terminal de (C-Shh), de 27 kilodaltons. Ambos péptidos los secretan células de la notocorda y de la placa del suelo.

En el laboratorio de McMahon, al que pertenezco, y en los de Jessell y de P. Beachy se ha estudiado la posible actividad de *Shh* como inductor de tipos celulares ventrales. Para ello se emplearon péptidos recombinantes en ensayos similares a los descritos anteriormente. Ambos grupos llegamos, por separado, a la misma conclusión: la actividad inductora de la proteína determinada por el gen *Shh* reside en el péptido amino-terminal, no en el carboxi-terminal. N-Shh induce la diferenciación de motoneuronas y de células de la placa del suelo. Ambos grupos demostramos que la diferenciación de estos dos tipos celulares se produce en respuesta a distintas concentraciones del inductor.

Nuestro grupo observó, además, que la capacidad inductora de la notocorda se bloquea con anticuerpos específicos de N-Shh. De ello se infiere que la actividad de N-Shh es no sólo suficiente, sino también necesaria, para la inducción de motoneuronas. Por consiguiente, hemos postulado que *Sonic hedgehog* sería un morfógeno, el primero conocido, capaz de inducir la diferenciación de tipos celulares ventrales en el sistema nervioso.

Según ocurre frecuentemente en el quehacer científico, una respuesta desencadena un aluvión de nuevas cuestiones. ¿Cuáles son los mecanismos moleculares implicados en la respuesta a *Shh*? Considerado el patrón de expresión de *Shh* a lo largo del tubo neural, ¿puede esta proteína inducir la diferenciación de otros tipos celulares ventrales en zonas más rostrales, por ejemplo en neuronas dopaminérgicas? Si así fuera, tendría una importante repercusión terapéutica.

ELISA MARTÍ GOROSTIZA
Universidad de Harvard

Anillos de protoplanetas

Más allá de Neptuno

Se sospechaba tiempo atrás que los suburbios del sistema solar, que empiezan a cierta distancia de Neptuno, podrían ser un lugar concurrido. Pero sólo hace poco han ido los telescopios descubriendo hasta qué punto están pobladas esas barriadas periféricas.

Los datos que van saliendo poco a poco del *Telescopio Espacial Hubble* y de otras fuentes permiten inferir que el sistema solar está rodeado por un vasto disco de cometas helados —algunos de cientos de kilómetros de envergadura—, el cinturón de Kuiper. Plutón y su luna, Caronte, cuyos diámetros son de 1200 y 600 kilómetros, respectivamente, quizá no sean sino los elementos más destacados del cinturón.

De esa base emergen, probablemente, cometas como el Shoemaker-Levy 9, que se estrelló contra Júpiter de forma espectacular hace dos años. Las investigaciones venideras sobre

esta región arrojarán, sin duda, luz más potente sobre las condiciones que precedieron al nacimiento de los planetas en el sistema solar interior. "Es un laboratorio maravilloso para estudiar cómo se formaron los planetas", dice Harold F. Levison, del Instituto de Investigación del Sudoeste en Boulder, adscrito al equipo del *Hubble*.

El nombre del cinturón le viene de Gerard P. Kuiper; éste planteó en 1951 que el sistema solar podría estar rodeado por un disco de desechos —similar a los anillos de Saturno— que no se concentraron en planetas desarrollados. Levison señala que otro astrónomo, K. E. Edgeworth, adelantó una teoría parecida dos años antes. Pero Kuiper, que ya era uno de los expertos planetarios más destacados del mundo, recibió —y aceptó— todo el mérito de la predicción.

En los años ochenta se percibieron anillos como los de Saturno alrededor de otras estrellas, en especial Beta Pictoris. Pero los telescopios han tardado en poder observar los fragmentos sueltos que rodean a nuestra propia estrella, el Sol. El primero se divisó hace cuatro años. Con un telescopio de 2,2 metros de Mauna Kea, David C. Jewitt, de la Universidad de Hawai, y Jane Luu, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, hallaron un objeto de unos cien kilómetros de ancho más allá de Plutón.

Desde entonces, Luu, Jewitt y otros han contado una treintena de objetos de un tamaño similar. Esto sugiere que debe de haber decenas de miles de estos "planetesimales" dando vueltas alrededor del Sol. Los hallazgos han constituido el acicate para que otros investigadores se pregunten si el anillo de Kuiper no podría alojar muchos objetos menores, de tamaño cometario, tan pequeños que el telescopio hawayano no puede verlos.

Para comprobar esta hipótesis, Levison y tres colegas —F. Alan Stern, del Instituto de Investigación del Sudoeste, Anita L. Cochran, de la Universidad de Texas en Austin, y Martin J. Duncan, de la Universidad Queen's en Ontario— apuntaron el *Hubble* hacia una zona del cielo no demasiado abarrotada, en la constelación de Tauro. A duras penas consiguieron ver unos 30 objetos de unos 12 a 20 kilómetros de ancho. Se cree que estos objetos tienen la misma constitución que los cometas: un núcleo helado con un recubrimiento de hollín que refleja poca luz. Levinson compara la detección de estas bolas de nieve negras con la observación de una bombilla de 100 watts que se encuentre veinte veces más lejos que la Luna.

Extrapolando sus resultados, los investigadores del *Hubble* calculan que hay por lo menos 200 millones, y puede que hasta cinco mil millones, de objetos similares a esos treinta girando alrededor del sistema solar. Cochran espera que nuevas observaciones descubran sus órbitas y el abanico entero de sus tamaños. ¿Hay cada vez menos a medida que su tamaño crece —según una potencia dada— o los hay sólo de unos cuantos tamaños básicos?

Cochran confía también en conocer el espesor y la anchura del cinturón. Algunos analistas calculan que la distancia del anillo interior al borde externo podría ser 500 veces mayor que la distancia de la Tierra al Sol.

Los datos reunidos hasta ahora apoyan la tesis de que el cinturón de Kuiper es la fuente de la mayoría de los cometas de período corto, es decir, de los que dan una vuelta al Sol en 200 años o menos. Estos cometas orbitan en general dentro del mismo plano que ocupan los planetas y el propio cinturón de Kuiper.

Otra clase de cometas —entre los que destaca el Halley, que pasó cerca de la Tierra por última vez en 1986— entra en el sistema solar desde todas las regiones del espacio. Quizá procedan de la nube de Oort, nebulosa esférica de cometas que, según se cree, fue catapultada fuera del sistema solar hace miles de millones de años. Los astrofísicos calculan que la nube de Oort está mil veces más lejos del Sol que el cinturón de Kuiper.

Al contrario que éste, la nube de Oort sigue estando mucho más allá de lo que pueden ver los astrónomos... por ahora.

JOHN HORGAN

Información neuronal

La importancia de las dendritas

El microcircuito de silicio está todavía en la prehistoria de las ciencias de la información. Una unidad elemental con millones de años de antigüedad, la neurona, ejecuta un número muy superior de cálculos en milésimas de segundo. En el asta espinal de la médula, por ejemplo, una sola motoneurona integra 10.000 contactos sinápticos diferentes para generar una respuesta. En el cerebelo, una sola célula de Purkinje procesa información procedente de hasta 200.000 fibras paralelas. Debido a que la influencia de cada conexión puede ser muy distinta, resulta cuando menos sorprendente que las motoneuronas muevan músculos y las células de Purkinje coordinen movimientos sin que apenas nos demos cuenta.

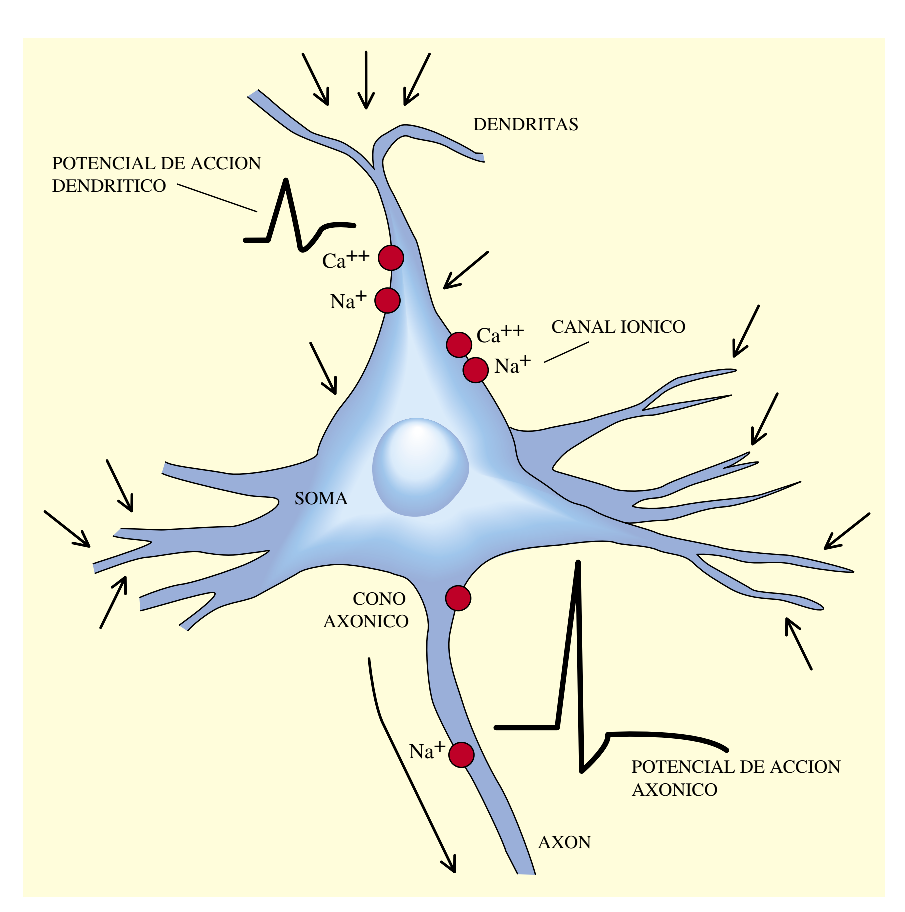
¿Cómo procesan información las neuronas? Santiago Ramón y Cajal abordó ya esta cuestión en el siglo pasado. Basado en sus dibujos anatómicos, llegó a la conclusión de que "las corrientes" neuronales viajaban desde las dendritas y el soma de la neurona hasta el axón, y desde éste a otras neuronas. Décadas más tarde, los electrofisiólogos descubrieron que cada conexión producía corrientes locales en la neurona, que podían ser excitadoras o inhibidoras. Cuando la suma de estas corrientes alcanzaba cierto umbral excitador, la neurona producía un potencial de acción que se transmitía a través del sistema nervioso.

Aunque no es grano de anís sumar decenas de miles de cifras, la investigación reciente nos revela que las neuronas realizan cálculos harto más complejos. La membrana plasmática de las neuronas está cubierta de poros (canales iónicos) por donde pasan alrededor de 10.000.000 de iones por segundo. Cierto tipo de canal, el canal de sodio dependiente de la diferencia de potencial (Na^+ voltaje-dependiente), resulta decisivo para generar el potencial de acción. No ha de extrañarnos la abundancia de canales de Na^+ en el cono axónico, la zona de la neurona donde se origina el potencial de acción. Lo insólito es el descubrimiento de canales de Na^+ y Ca^{++} en las dendritas neuronales. ¿Cuál es la función de estos canales?

En principio, los canales dendríticos de Na^+ y Ca^{++} deberían poder generar también potenciales de acción. Como cabía esperar, no se tardó en demostrar que así ocurría. Los potenciales de acción dendríticos suelen presentar una amplitud menor que los potenciales de acción axónicos, aunque se transmiten con similar rapidez al resto de la neurona. Es evidente que este hallazgo complica enormemente los cálculos neuronales. Ya no se trata de una suma de corrientes locales; los potenciales de acción dendríticos añaden nuevas variables a la ecuación. Para entender estas variables, hemos de conocer en qué situaciones se generan.

Ya a principios de los años sesenta, Spencer y Kandel habían observado ciertos "prepotenciales" que precedían a los potenciales de acción en neuronas del hipocampo. Según Spencer y Kandel, estos "prepotenciales" podrían originarse en la dendrita por las propias conexiones sinápticas, y su función sería la de amplificar información procedente de sinapsis lejanas. Los "prepotenciales dendríticos" actuarían de forma similar a los centros repetidores de radio, reforzando señales distantes, en este caso, al soma neuronal.

Más recientemente, Stuart y Sakmann propusieron una versión diferente acerca del origen de los potenciales de acción dendríticos. El potencial de acción generado en el cono axónico se transmite con rapidez a otras neuronas gracias a la presencia de canales de Na^+. Si estos canales sólo existieran en el axón y el cono axónico, la propagación del potencial de acción en otras posibles direcciones se vería enormemente atenuado. Pero, ¿qué pasa si esto no es así? Stuart y Sakmann sugirieron que los canales de Na^+ y Ca^{++} del soma y las dendritas permitirían la retropropagación del potencial de acción. De esta forma, el potencial de acción axónico podría originar los potenciales de acción dendríticos y controlar así la entrada de información en la neurona.



Las neuronas procesan decenas de miles de señales en milésimas de segundo con "aparente facilidad". El cómo lo hacen constituye todavía una incógnita, aunque las dendritas podrían facilitar el camino.

Durante los últimos años, el origen y función de los potenciales de acción dendríticos ha sido tema de intenso debate. Nuestro propio laboratorio decidió entrar en liza poniendo a prueba la idea original de Spencer y Kandel. Las neuronas de la corteza visual reciben conexiones sinápticas que se activan en respuesta a estímulos luminosos. Según la hipótesis de Spencer y Kandel, los potenciales de acción dendríticos amplificarían estas señales sinápticas y, por tanto, deberían evocarse también en respuesta a estímulos luminosos. Además, los potenciales de acción dendríticos deberían originarse incluso en ausencia de los propios potenciales de acción axónicos, pues habría de bastar las conexiones sinápticas para generarlos.

La mayoría de los estudios anteriores sobre potenciales de acción dendríticos se realizaron en neuronas desprovistas de muchas de sus conexiones (*in vitro*). Sin embargo, nuestros experimentos requerían neuronas de la corteza visual cuyas conexiones estuvieran intactas (*in vivo*). La ventaja de utilizar preparaciones *in vivo* es que podemos estudiar la producción de potenciales de acción dendríticos cuando la neurona está procesando información, por ejemplo en nuestro caso, información visual. En su contra tiene que la neurona no es tan accesible como *in vitro*, y los productos farmacológicos que podemos utilizar se reducen a los que se incluyen dentro de la pipeta de registro. Debíamos, pues, escoger una sola droga que permitiera dar una respuesta al problema.

Nos decidimos por registrar desde el interior de neuronas perfundidas con QX-314, un agente que bloquea los canales de Na^+. Utilizando esta droga, bloqueábamos los potenciales de acción producidos en el cono axónico y los potenciales de acción dendríticos de Na^+. Sin embargo, dejábamos intactos los potenciales de acción dendríticos de Ca^{++}, permitiéndonos abordar la pregunta acerca de su origen. La respuesta no se hizo esperar. Nuestros experimentos demostraron que los estímulos visuales eran capaces de evocar potenciales de acción dendríticos de Ca^{++}, incluso en ausencia de los potenciales de acción de Na^+.

Otros trabajos *in vitro*, junto con nuestros propios resultados, sugieren que los potenciales de acción dendríticos tienen un papel amplificador, según lo predicho por Spencer y Kandel. Nuestros experimentos no descartan, sin embargo, una importante función para la retropropagación de los potenciales de acción de Na^+, tal como los elegantes trabajos de Stuart y Sackmann sugieren. Es muy posible que los potenciales de acción dendríticos se generen por diversos mecanismos y sus funciones sean dispares.

¿Cómo procesan información las neuronas? La respuesta sigue en el aire. Aunque cada vez estamos más cerca de comprender en qué consisten "las ecuaciones neuronales", su complejidad será todavía un desafío para varias generaciones de científicos por muchos años.

José Manuel Alonso,
Clay R. Reid
y Judith A. Hirsch
Universidad Rockfeller
Nueva York

De cerca

Fotos: Xavier Ferrer y Adolfo de Sostoa
Texto: Xavier Ferrer

El hornero

Hay animales asociados a la historia o la mitología de un país. Algunos estados los incorporan incluso al escudo nacional. La pampa argentina tiene también su emblema, en este caso ornitológico: el hornero (*Furnarius rufus*). Pero el área de distribución del ave es más dilatada, aunque coloniza siempre espacios abiertos, praderas o sabanas, desde la brasileña Goiás hasta el Río Negro argentino. Su nombre común, derivado del latín, alude a la configuración del nido, un habitáculo de barro con aspecto de horno, de paredes gruesas que pueden llegar a pesar hasta 4 kg. El hornero construye cada temporada un nuevo hogar, con barro, algo de paja, pelo y boñigas. Desde el punto de vista arquitectónico recuerda las cabañas de adobe que los humanos edifican en los lugares muy soleados. La alta capacidad calorífica de las paredes gruesas de barro estabiliza las temperaturas internas, absorbiendo el calor del sol durante el día y liberándolo gradualmente durante la noche. Sin embargo, en el caso del hornero el nido no es sólo morada sino también incubadora, donde ave y hogar actúan a modo de una unidad.

Las características del nido de los horneros despiertan el interés de muchos otros pájaros, ya que resiste hasta ocho años sin estropearse. Para evitar parásitos, intrusos o simplemente molestias, el hornero se reproduce antes que otros paseriformes locales. Los gorriones (*Passer domesticus*) son colonos habituales de estos nidos. Lo es también otro granívoro, el fringílido *Sicalis flaveola*, conocido en Argentina como jilguero común, y en Venezuela como canario de tejado, y fotografiado con un teleobjetivo de 400 mm en Campos del Tuyú (Argentina). La foto principal del hornero con su nido se tomó en Uruguayana (Brasil) con un teleobjetivo de 300 mm.





Visión submarina y ruido de fondo

Mediante la técnica de formación de imágenes por iluminación acústica, los sonidos que se producen en el mar pueden "iluminar" objetos sumergidos y crear así películas en color sin necesidad del sonar

Michael J. Buckingham, John R. Potter y Chad L. Epifanio

"Ping...ggg". El timbre característico de la transmisión del sonar lo hemos aprendido en las películas de guerra submarina. Desde el clásico *Das Boot* hasta *La caza del Octubre Rojo*. Un eco distintivo le indica al oficial la presencia y posición de un blanco. También se puede recibir pasivamente el sonido generado por éste. Pero en una y otra técnica, el ruido que baña el océano enturbia la pureza de la señal. Las olas que rompen, los barcos que navegan por la cercanía, la lluvia que cae y hasta los mismos habitantes del mar, como el coletazo de un langostino, contribuyen a la cacofonía general. Nada tenía, pues, de extraño, que los operadores de sonar considerasen desde siempre un obstáculo tamaño ruido de fondo y se esforzaran lo indecible por eliminar los efectos por él inducidos.

Se trata, sin embargo, de un planteamiento que está cambiando poco a poco. Los investigadores empiezan a reconocer la utilidad posible de dicho rumor de fondo. El ruido rodea a cualquier objeto sumergido en el océano; el objeto, a su vez, modifica ese campo ruidoso en un sentido que dependerá de su propia morfología, composición y posición. Lo que nos lleva a establecer cierto paralelismo del ruido ambiental con la luz solar que baña la atmósfera. Podemos ver y fotografiar los objetos en el exterior porque difunden, reflejan o modifican de cualquier otra guisa la luz ambiental. De forma similar, el ruido que baña el océano actúa a la manera de una "luz del día acústica".

Más aún. Según demuestran experimentos recientes, podemos crear imágenes de objetos sumergidos usando el ruido ambiental por fuente de iluminación. Nuestros resultados nos permiten ya afirmar que la formación de imágenes por iluminación acústica sirve efizcamente para determinadas aplicaciones, desde la seguridad de los puertos hasta la detección de minas submarinas.

Ni que decir tiene que, de momento, las imágenes resultantes carecen del menor atractivo estético. La resolución de la imagen no puede compararse con la que se alcanza con luz óptica. La agudeza de la visión humana resulta de la capacidad de la pupila, cuya dilatación multiplica por 10.000 el tamaño de la longitud de onda de la luz visible, lo que permite al ojo "recoger" un gran número de ondas luminosas. Para llegar a una resolución semejante con el sonido, se requeriría un inmanejable receptor de 600 metros de anchura. Ahora bien, el agua del mar absorbe fuertemente la luz y demás formas de radiación electromagnética; por ello, el sonido se ha convertido en el medio favorito —y, en muchos casos, el único— de adquirir información acerca de las profundidades oceánicas.

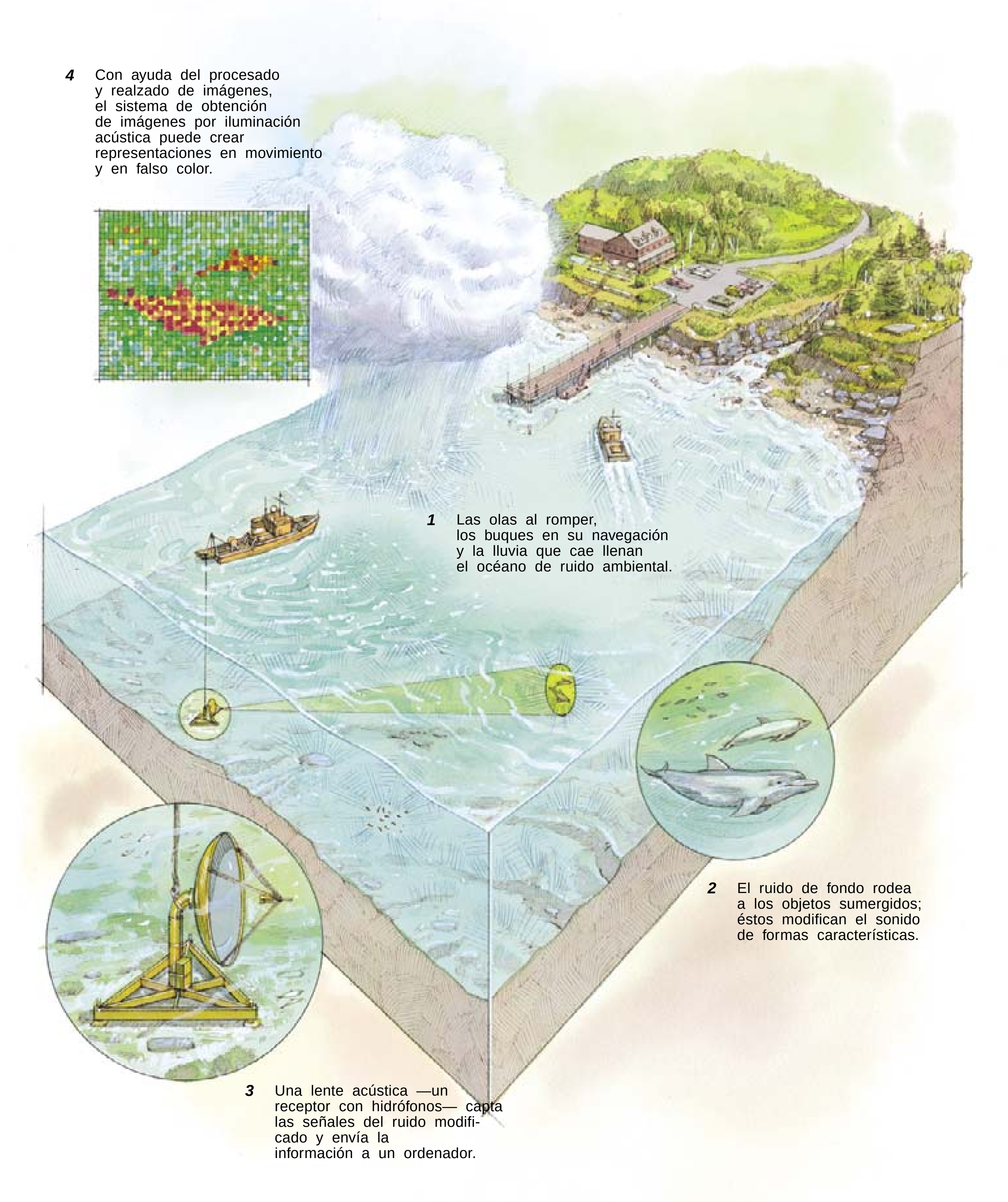
El interés de la humanidad por el sonido en el mar se remonta a la antigüedad clásica. Aristóteles y Plinio el Joven se preguntaron ya si los peces podían oír. Los pescadores de la antigua China localizaban los cardúmenes con una caña de bambú, que, a modo de instrumento de escucha submarina, sumergían por uno de los extremos. Leonardo de Vinci desarrolló esa misma idea y anotó, en sus estudios de las propiedades del agua, que "si paramos nuestra embarcación y colocamos un cabo de un tubo largo en el agua y el otro en el oído del observador, se podrán oír barcos muy distantes".

Con todo, hubo que esperar hasta principios de nuestro siglo para que los inventores construyeran el primer sistema de localización sónica a fin de defenderse de la amenaza submarina durante la primera guerra mundial. Por rudimentarios que fueran tales aparatos submarinos, constituyeron la base de todos los sonares que les sucedieron, el desarrollo de los cuales se aceleró durante la segunda guerra mundial. Los actuales sistemas de sonar, de aplicación generalizada en la armada, el comercio y la investigación oceanográfica, han evolucionado hacia un alto grado de complicación. Pese a ello, operan, en esencia, según los mismos principios que sus predecesores: transmiten activamente sonidos o reciben pasivamente los sonidos producidos por un blanco.

Dada la histórica insistencia en técnicas activas y pasivas, no es sorprendente que una idea del todo novedosa sobre la función del ruido, la de la "visión" en las entrañas del océano, se desarrollara sólo en fechas recientes. A mediados de los años ochenta, uno de los autores

MICHAEL J. BUCKINGHAM, JOHN R. POTTER y CHAD L. EPIFANIO desarrollaron la técnica de formación de imágenes por iluminación acústica en la Institución Scripps de Oceanografía en La Jolla, California. Buckingham, docente de acústica oceánica en dicho centro, es también profesor de la Universidad de Southampton. Apasionado por la navegación a vela, Potter cruzó el océano Pacífico el otoño pasado para dirigir el laboratorio de investigación acústica de la Universidad Nacional de Singapur. Epifanio prepara un trabajo de investigación sobre iluminación acústica en Scripps.

Modo de proceder de la iluminación acústica





1. UNA ORCA EN EL PARQUE de Mundo Marino de San Diego, en California, sirvió de blanco móvil para ADONIS, el primer sistema de formación de imágenes por iluminación acústica que se ha creado.

(Buckingham) cayó en la cuenta de que la formación de imágenes en el ojo no era activa ni pasiva: el ojo funcionaba de una manera que difería radicalmente de los métodos empleados en el aprovechamiento de la acústica océanica.

Asentada esa idea, brotó espontáneo el pensar sobre la posibilidad de crear un correlato submarino de la formación visual de imágenes. Desde el punto de vista práctico, la creación de imágenes por iluminación acústica debería evitar los principales inconvenientes que presentan las técnicas al uso en detección submarina: la ecolocalización revela inevitablemente la presencia del operador, y la detección pasiva, aunque secreta, no sirve cuando se trata de blancos que hacen poco o ningún ruido.

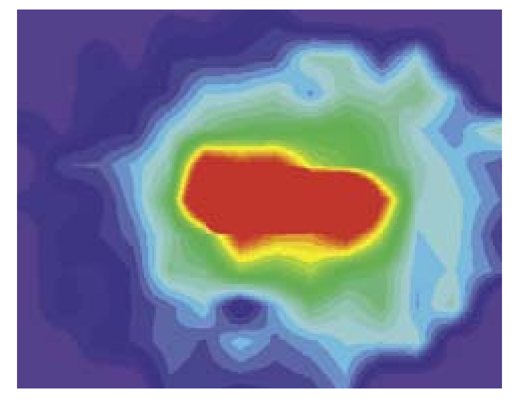
A mediados de 1991 realizamos los primeros experimentos de iluminación acústica en el océano Pacífico frente al muelle Scripps de la Institución Oceanográfica Scripps en La Jolla, California. Había un joven teniente de la armada, Brodie Berkhout, que en el curso de su tesina para obtener la licenciatura en ciencias en Scripps construyó y situó el equipo. El aparato principal era un receptor acústico en forma de un simple reflector parabólico de 1,2 metros de diámetro, con un hidrófono (micrófono submarino) instalado en el foco. El reflector desempeñaba el papel de lente acústica.

Con el experimento nos proponíamos responder a una pregunta elemental: ¿Varía el nivel de ruido en el receptor cuando se coloca un objeto en su "haz", esto es, en su campo de audición? Sirvió de blanco un panel rectangular de madera contrachapada, de 0,9 por 0,77 metros y recubierto con goma de neopreno, un buen reflector y difusor del sonido. Hallamos que, para frecuencias entre 5 y 50 kilohertz (dentro del dominio de olas que rompen, la fuente principal y habitual de ruido ambiental en el océano), la intensidad del ruido se duplicaba literalmente cuando el blanco se colocaba en el campo auditivo del reflector. Este resultado persistió cuando alejamos el blanco de 5 a 12 metros del receptor. Además, el blanco reflejaba intensamente algunas frecuencias y absorbía otras, fenómeno que puede interpretarse como "color" acústico. Ello sugería que podíamos traducir las variaciones de la señal acústica recibida en tonalidades ópticas que permitieran crear imágenes en falso color acústicamente iluminadas.

Espoleados por el éxito, empezamos a pensar en la siguiente fase del proceso. El reflector parabólico con un hidrófono en su foco "mira" sólo en una dirección, que corresponde a un píxel de una imagen. Para crear una representación cabal se requieren más píxeles, lo que significa que se necesitan más "haces" receptores (a la manera del ojo compuesto de una mosca). El ruido recogido en cada haz receptor podría entonces convertirse en determinado nivel de brillo en un píxel de un monitor de vídeo, donde la intensidad del ruido gobernaría el grado de brillo. Lo mismo que en una fotografía de periódico, el contraste entre los píxeles permitiría al ojo interpretar el resultado como si se tratara de una imagen fotográfica más o menos granular.

El éxito del ensayo inicial nos convenció de que podíamos obtener imágenes genuinas con iluminación acústica que contuvieran 100 o más píxeles. A mediados de 1992 comenzamos a preparar una nueva lente acústica, que daría en llamarse ADONIS (de *Acoustic-Daylight, Ambient-Noise Imaging System*, sistema de construcción de imágenes mediante iluminación acústica por ruido ambiental). En colaboración







2. BLANCO en forma de barra (*izquierda*) del que ADONIS creó una imagen de figura vagamente alargada y coloreada en falso color (*arriba, a la izquierda*). Cada "píxel" representa las señales de un hidrófono. El procesado mediante ordenador realzó la imagen (*arriba, a la derecha*).

con EDO Acoustics, de Salt Lake City, Utah, que produjo una red elíptica de 128 hidrófonos para ADONIS, construimos un reflector esférico de tres metros de diámetro; colocamos los hidrófonos en el foco del disco. El sistema formaba un campo total de visión de unos seis grados (horizontal) por cinco grados (vertical), lo que viene a ser una décima del campo angular que permite una cámara normal.

Sumergimos ADONIS, con su aspecto de antena de recepción de satélite, hasta el fondo del mar en agosto de 1994. Lo bajamos desde *R/P ORB*, una plataforma de investigación de Scripps que está anclada frente a Punta Loma, en el sur de California. Los blancos cuya imagen se deseaba obtener estaban constituidos por unos paneles cuadrados de lámina de aluminio, de un metro de lado, recubiertos de goma de neopreno. Los paneles se montaron en diversas configuraciones sobre un armazón, similar al tablero del juego de tres en raya, situado en el fondo del océano. Apenas había visibilidad en las aguas del fondeadero, agitados como estuvieron los sedimentos durante la mayor parte del experimento. En cierta ocasión, el grado de turbiedad era tal que Hélène Vervoort, una de nuestros buzos, chocó con el armazón del blanco.

Junto al mástil que sostenía el reflector esférico había una caja estanca, donde estaba instalado el equipo electrónico. Este, ideado por nuestro colaborador Grant B. Deane, realizaba, entre otras tareas de procesado, la de convertir a forma digital los datos de ruido ambiental obtenidos por ADONIS. Los datos se transmitían luego a la superficie y se convertían en imágenes en tiempo real y en falso color en el monitor de un ordenador Macintosh de sobremesa. Ni que decir tiene que una inmensa cantidad de tiempo y trabajo pendía en la balanza cuando sumergimos por vez primera el ADONIS hasta el fondo del mar.

Mirábamos en silencio expectante cómo ADONIS desaparecía bajo la superficie. Pero el embeleso se rompió, y no precisamente por un éxito resonante. Los indicadores a bordo que vigilaban varias fuentes de energía se dispararon en seguida. Era la señal de que el agua del mar estaba penetrando en la caja estanca de la parte electrónica. Izamos el ADONIS. Abrimos la caja y salieron chorros de agua. En un movimiento reflejo, desmontamos las tarjetas de los circuitos y las sumergimos en agua desionizada. Pero nadie realmente creía que pudieran salvarse. Gracias a la ayuda de muy diverso origen, limpiamos las tarjetas con alcohol, comprobamos todos los componentes electrónicos del complicado sistema de 128 canales, los sustituimos donde hizo falta y sellamos la fuga de la caja. Veinticuatro horas más tarde, ADONIS volvía al mar.

La tensión de los asistentes llegó a su clímax en la plataforma *ORB* mientras los buzos hacían las últimas comprobaciones del equipo. Empezaron a recibirse los primeros datos en el laboratorio. Habíamos colocado los tres paneles en el armazón de suerte que formasen un

De cómo sacar partido del ruido

La creación de imágenes por iluminación acústica constituye una nueva faceta de la técnica de teledetección que descansa sobre el ruido de fondo de los mares. Los oceanógrafos han resaltado otros ejemplos de técnicas similares. Así, se ha recurrido al ruido ambiente para determinar las propiedades acústicas del fondo marino y, por ende, determinar hasta cierto punto su composición. En las aguas someras de las plataformas continentales, donde la profundidad es inferior a unos 200 metros, el ruido se refleja en el fondo. La forma en que el sonido rebota indica la velocidad con la que las vibraciones se propagan por el fondo. Velocidad de vibración que nos lleva a conocer la composición del fondo: no es la misma la velocidad del sonido en un fondo rocoso que a través de otro arenoso, por ejemplo.

Para llevar a cabo tales mediciones, se puede desplegar una flota de hidrófonos prendidos de boyas que permitan cartografiar el fondo marino basándose en el ruido ambiental. Se confía en que este método ofrezca una opción alternativa más económica que los tradicionales; por ejemplo, la acostumbrada práctica, lenta y laboriosa, que consiste en detectar señales de sonar reflejadas en el fondo del mar.

Podemos también acudir a los sonidos de fondo para investigar procesos de superficie marina. Nos pueden revelar la cantidad de gas atmosférico absorbido por el océano. Un parámetro crucial en los modelos de calentamiento global y de efecto de invernadero es el grado de intercambio de gas; sin embargo, se resiste a su cuantificación. Para lograrlo puede ayudarnos el ruido ambiental, habida cuenta de que el principal fenómeno responsable del sonido es precisamente también el que rige el intercambio de gas entre aire y agua: es decir, las olas rompientes. Al introducir aire en el agua, el proceso crea una capa de burbujas debajo de la superficie. Estas burbujas provocan una modificación característica del sonido de las olas rompientes, dejando una marca acústica que los hidrófonos bajo las burbujas pueden detectar.

A partir de esa medición acústica elemental, se infiere la cantidad de aire que hay en la capa de burbujas y la profundidad hasta la cual se extiende ésta. Ambas magnitudes están relacionadas con la cantidad de gas que penetra en el océano. Ciertos ensayos de tanteo abonan la viabilidad de la idea. Para confirmarlo están en marcha experimentos de mayor fuste. *—M. J. B.*



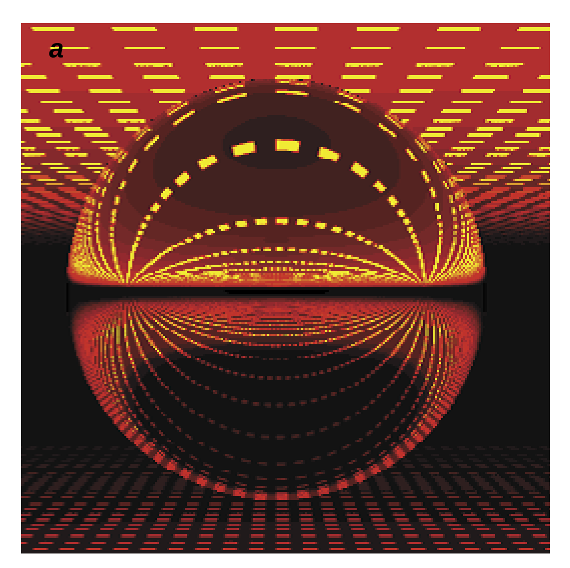
***EL RUIDO AMBIENTAL también podría servir para medir las propiedades acústicas del fondo oceánico* (izquierda) *y la cantidad de gas absorbida por el mar* (derecha).**

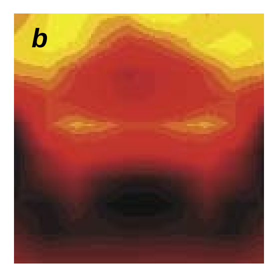
blanco horizontal y sencillo, de un metro de alto por tres de ancho, a 18 metros de distancia del ADONIS. Nos congregamos en torno al monitor. Apareció una forma rectangular, débil, que casi llenaba el espacio elíptico de imagen. Estábamos ante la primera imagen obtenida por iluminación acústica.

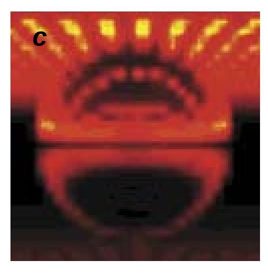
Minutos después, nuestra confianza en el sistema de creación de imágenes se desbordó. Los buzos habían colocado una fuente de sonido en el centro del blanco para que pudiéramos alinear ADONIS con el tablero del blanco. Pero la fuente demostró ser innecesaria: podíamos ver dónde estaba el blanco guiados sólo por el ruido ambiental. Aumentamos entonces la separación entre ADONIS y el blanco desde 18 hasta 38 metros, la máxima distancia que nos permitía permanecer al abrigo de los efectos del tráfico marítimo. Esperábamos que, a esa lejanía, se produjera quizás una ligera degradación de la calidad. Mas, para nuestra sorpresa, el blanco se hizo mucho más nítido. Por supuesto, la imagen redujo también su tamaño precedente; en compensación, el océano circundante formó un bello fondo de contraste que realzaba espectacularmente el blanco rectangular. Mientras esas imágenes continuaban apareciendo en la pantalla, renovadas 30 veces por segundo, comprobamos el éxito de la creación de imágenes por iluminación acústica.

Quedaba todavía mucho por averiguar en ese ensayo. Nos proponíamos saber si ADONIS podía detectar objetos en movimiento. Montado dentro del mástil que sujetaba la antena parabólica, había un motor hidráulico capaz de hacer girar lentamente el receptor esférico en azimut; tardaba unos 12 minutos en completar una revolución de 360 grados. Mientras el disco giraba, veíamos aparecer el blanco a un lado de la pantalla y moverse despacio hacia el centro, para terminar por desaparecer en el lado opuesto. No cabía la menor duda de que podíamos crear imágenes en movimiento.

Faltaba una prueba más, la más difícil de todas. Los buzos sustituyeron en el armazón el blanco en forma de barras por cuatro paneles, que daban figura a una cruz con brazos verticales y horizontales y un hueco de un metro cuadrado en el centro.







3. IMAGENES SIMULADAS de una esfera de acero que ponen de manifiesto las posibilidades futuras de la iluminación acústica. El ruido ambiental procede de olas que rompen, representadas por trazos amarillos. Un sistema con 90.000 píxeles proporcionaría la mejor resolución (*a*), pero probablemente no es práctico. La técnica actual emplea ya unos 100 píxeles (*b*) y se están proyectando sistemas que usarán 900 píxeles (*c*).

El reto estribaba en la resolución del hueco: a 38 metros de distancia, el tamaño del hueco debería hallarse próximo al límite de resolución de ADONIS.

Las primeras imágenes, en bruto, del blanco cruciforme llegaban borrosas. Percibíase la forma de la cruz, pero la apariencia del hueco central variaba de un instante a otro. Hemos reexaminado luego los datos y los hemos sometido a cierto procesamiento por ordenador. Resulta que el espectro de potencias del ruido —o intensidad del sonido a diferentes frecuencias— sirve de función discriminante. Constituye, a grandes rasgos, la versión acústica del color.

Apoyados en el espectro de potencias, identificamos sin dificultad las cuatro esquinas vacías y el hueco del blanco cruciforme, amén de situar los bordes de los paneles. Estos perfiles mostraban un “color” diferente del ofrecido por las regiones vacías, incluido el hueco central. Algo así como si el armazón apareciese en “rojo” y el hueco en “azul”. En estos momentos trabajamos en las posibilidades de esta técnica para realzar las imágenes acústicamente iluminadas.

Los blancos estáticos nos habían servido también para demostrar la viabilidad técnica de la creación de imágenes por iluminación acústica. Estimulados por los resultados obtenidos, estábamos impacientes por probar con un blanco más difícil: las orcas (*Orcinus orca*). Gracias a los buenos oficios de Ann Bowles, bióloga del Instituto Hubbs de Investigación del Mundo Marino, de San Diego, fuimos invitados a instalar ADONIS en el acuario al aire libre de orcas que posee dicho centro. Se nos dejaría intentar formar imágenes de esos mamíferos marinos sumamente inquietos, al par que Bowles aprovecharía la ocasión para estudiar la respuesta de los animales a un objeto extraño en “su” piscina. Según parece, las orcas consideran que cualquier cosa introducida en el acuario les pertenece por definición.

En febrero de 1995, trabajando entre las sesiones abiertas al público de las orcas, colocamos el sistema ADONIS en un rincón del acuario en condiciones meteorológicas bastante desfavorables. La lluvia caía sin cesar. Para proteger los ordenadores y equipos de registro, plantamos toscas tiendas de campaña, pero aun así el agua se metía por todas partes.

Mientras instalábamos el sistema, las orcas nadaban con absoluta libertad en el acuario, mostrándonos parejo interés al que nosotros sentíamos por ellas. Recelosas al principio, no tardaron en acostumbrarse al gran disco reflector. Les picó la curiosidad al comprobar que, debido a su efecto focalizador, el sonido se reflejaba con intensidad hacia ellas cuando se agitaban ruidosamente ante el disco. Splash, un macho joven, se atrevió a morder uno de los cables de la electrónica, lleno de aceite (crujiente por fuera, gomoso por dentro), para efectuar una masticación exploratoria. Otro ejemplar nadó a gran velocidad hacia el plato de la antena y rompió la parte superior. El trabajo no podía continuar así. Los monitores se llevaron las orcas a otro estanque donde podían disfrutar de sus propios juguetes hasta que nosotros estuviéramos listos para trabajar con ellas.

Tras un comienzo en falso (todas las tarjetas electrónicas del interior de la caja estanca se habían soltado de sus conectores durante el transporte), pusimos de nuevo a punto el equipo y los datos comenzaron a llegar. No sabíamos a ciencia cierta lo que saldría. Las bombas y otras máquinas potencian muchísimo el ruido de los acuarios del Mundo Marino, hasta niveles comparables con los del océano. Pese a algunos daños menores que la circuitería había sufrido a raíz de la inundación por agua del mar, se recibieron las señales procedentes de 126 canales y se representaron en forma de imágenes móviles en tiempo real. (En total, los canales desplegados habían sido 128.)

Mientras observábamos en la pantalla los datos en bruto (esto es, sin realzado de imagen), apareció de pronto una forma borrosa y permaneció ante la vista varios segundos. Mientras eso ocurría en el monitor, levantamos la mirada para observar, en el acuario, cómo una de las orcas entraba en el campo de visión de ADONIS, donde permaneció mientras nadaba alejándose en línea recta del disco. Tanto los hidrófonos de vigilancia como el personal del acuario confirmaron que las orcas no estaban transmitiendo sonidos, lo que indicaba que las imágenes que aparecían en pantalla eran el resultado directo de la iluminación acústica. Todavía no hemos examinado detenidamente las imágenes de las orcas, ni las hemos correlacionado con las grabaciones en vídeo que se hicieron a la par para confirmar si se trataba en verdad de una creación de imágenes de las orcas. Pero las observaciones provisionales y el experimento de la *ORB* frente a Punta Loma apoyan el paralelismo entre la fotografía con luz natural y la formación de imágenes submarinas con ruido ambiental.

Los resultados sugieren, de entrada, varias aplicaciones potenciales. Una es la detección de minas submarinas; las hay que se programan para detonar al recibir una señal de sonar. Un sistema de iluminación acústica puede localizar esas armas sin provocar su explosión. La creación de imágenes a partir del ruido ambiental podría proporcionar visión a los ingenios submarinos de propulsión autónoma, permitiéndoles rodear los obstáculos sin la ayuda de un operador humano instalado en un buque de superficie y así examinar el estado de la estructura de plataformas petrolíferas y otras grandes plataformas marinas. Por su carácter connaturalmente secreto, la formación de imágenes por iluminación acústica la hace apropiada para la vigilancia de fondeaderos —a la manera de las videocámaras que vigilan los grandes almacenes— y para conocer el número de mamíferos marinos, porque no habría interferencia sónica con éstos. (Lo que, a su vez, plantea la pregunta de si esas especies animales recurren a la iluminación acústica para adquirir información.)

Cabe, en teoría, llevar la obtención de imágenes por iluminación acústica un paso más allá. No olvidemos que está en una fase incipiente. En ensayos recientes, ADONIS consiguió extraer imágenes de flotadores de plástico, esferas de titanio y toneles de cloruro de polivinilo que contenían arena húmeda y espuma. A tenor de los análisis provisionales, se observan los barriles aun cuando reposen en el fondo del mar. Nos encontramos como en los primeros días de la televisión: lo importante no es tanto la calidad de las imágenes, cuanto el hecho de que se hayan obtenido. En los próximos meses sustituiremos el reflector esférico por un sistema regulado en fase que porte un millar de hidrófonos. Pensamos también ahondar en algoritmos que permitan realzar la imagen y su identificación automática. Con todo ello, esperamos avanzar en la calidad de las imágenes de iluminación acústica. Quién sabe si los herederos de ADONIS no se convertirán en las videocámaras submarinas del futuro.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IMAGING THE OCEAN WITH AMBIENT NOISE. Michael J. Buckingham, Broderick V. Berkhout y Stewart A. L. Glegg en *Nature*, vol. 356, páginas 327-329; 26 de marzo de 1992.

THEORY OF ACOUSTIC IMAGING IN THE OCEAN WITH AMBIENT NOISE. Michael J. Buckingham en *Journal of Computational Acoustics*, volumen 1, n.º 1, págs. 117-140; marzo 1993.

ACOUSTIC IMAGING USING AMBIENT NOISE: SOME THEORY AND SIMULATION RESULTS. John R. Potter en *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 95, n.º 1, páginas 21-33; enero 1994.

ACOUSTIC DAYLIGHT IMAGING: VISION IN THE OCEAN. Michael J. Buckingham y John R. Potter en *GSA Today*, vol. 4, n.º 4, págs. 97-102; abril 1994.

Explosiones galácticas

Las enormes emanaciones de gas que brotan del centro de galaxias cercanas podrían llegar a explicar la formación de estrellas y el medio intergaláctico

Sylvain Veilleux, Gerald Cecil y Jonathan Bland-Hawthorn

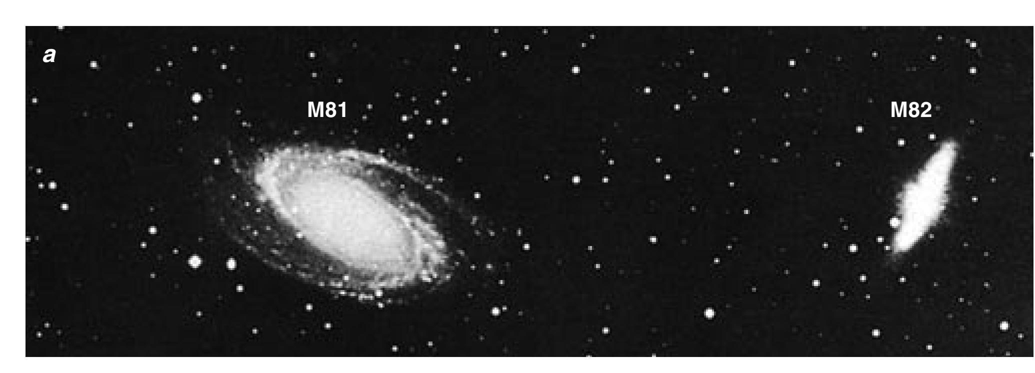
El cielo nocturno está iluminado por un número incontable de galaxias. Vemos la mayoría de ellas gracias a la luz conjunta de los miles de millones de estrellas que albergan. Pero en el núcleo de algunas hay una región puntiforme cuyo brillo supera con creces la luminosidad del resto de la galaxia. Los entresijos de estas dinamos galácticas son demasiado pequeños, de los que ni siquiera el *Telescopio Espacial Hubble* puede dar cuenta. Por suerte, a veces aparecen fuera del núcleo compacto de la galaxia restos de estas enormes explosiones, en forma de gases incandescentes cuya temperatura supera de lejos el millón de grados; su magnitud permite que se los observe directamente desde la Tierra.

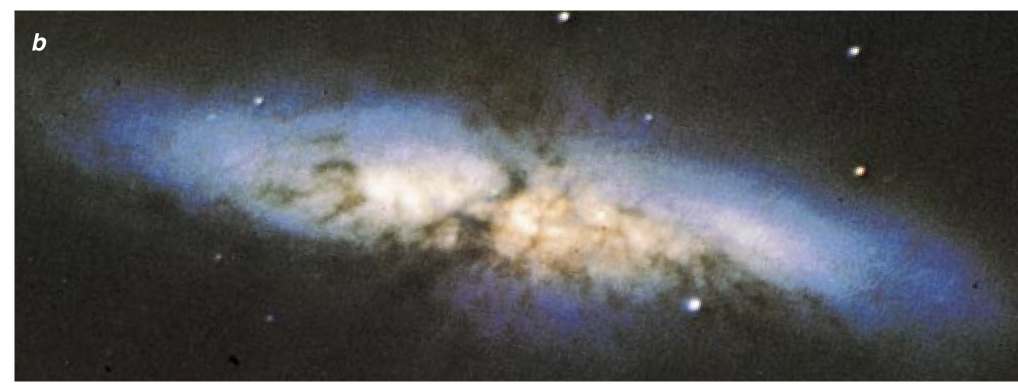
El rastro que deja esta materia caliente en el gas y el polvo interestelares que rodean el lugar de la explosión proporciona indicios importantes sobre la naturaleza y la historia de las poderosas fuerzas que operan en el interior del núcleo galáctico. Ahora se puede determinar qué tipo de mecanismo impulsa estas dinamos y los efectos de sus gigantescas emanaciones en el medio intergaláctico.

Además, debido a que estos cataclismos parecen tener lugar desde etapas precoces de la historia del universo, es casi seguro que afectaron al entorno en que evolucionó nuestra propia galaxia, la Vía Láctea. Saber cómo tienen lugar estos fenómenos hoy podría esclarecer la manera en que se produjo la distribución de los elementos químicos, de vital importancia en la formación de estrellas como el Sol.

Se han propuesto dos mecanismos muy distintos para explicar las dínamos galácticas. El primero lo concibieron Martin J. Rees, de la Universidad de Cambridge, y Roger D. Blandford, actualmente en el Instituto de Tecnología de California. A comienzos de los años setenta, ambos astrofísicos perseguían una explicación de la prodigiosa luminosidad —miles de veces la de la Vía Láctea— y los espectaculares chorros de radio (flujos sumamente concentrados de materia de gran energía) que se extienden a lo largo de millones de años luz desde el centro de algunos cuásares, galaxias jóvenes hiperactivas. Sugirieron que un agujero negro de masa grandísima —de tamaño no mucho mayor que el Sol pero con una masa un millón de veces superior quizá— podría constuir la fuente de combustión del cuásar.

Aunque los agujeros negros no producen prácticamente luz, el disco de materia de acreción que cae en espiral hacia el agujero se calienta e irradia energía conforme va aumentando su densidad. La parte interna y más caliente del disco produce fotones de rayos X y ultravioletas que abarcan un amplio intervalo de energías; el gas circundante absorbe una pequeña fracción de los mismos y se emiten de nuevo en forma de una serie de líneas espectrales, distintas, de luz ultravioleta y visible. En los años transcurridos desde que Rees y Blandford propusieron su modelo, se ha llegado a saber que otros agujeros





1. M82 (*a, b*), a unos 10 millones de años luz de la Tierra, se caracteriza por una emanación de gas incandescente que surge de la zona que rodea su núcleo (*c*). Se ha deducido que este fenómeno violento se debe a la súbita formación de estrellas cerca del núcleo galáctico. El calor y la radiación resultante hacen que el polvo y el gas del disco galáctico se precipiten en el espacio intergaláctico. La interacción con su vecina M81 podría haber causado la actividad de la galaxia.

negros similares podrían generar la energía que desprenden las galaxias activas más cercanas.

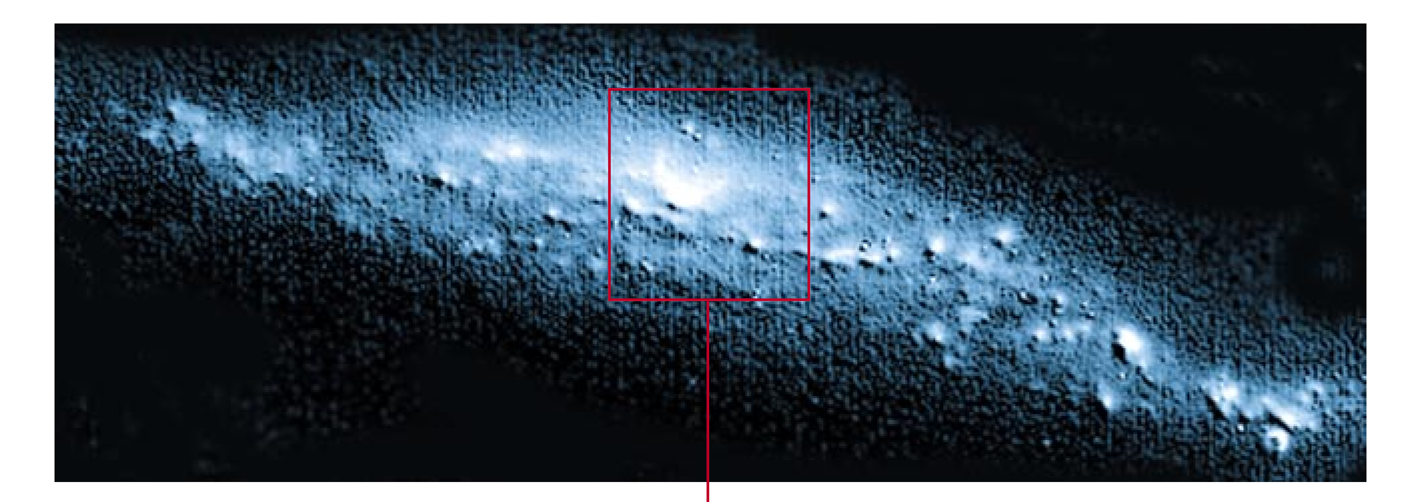
A medida que se calienta el disco, el gas de su entorno alcanza temperaturas de varios millones de grados y se expande, a alta velocidad, desde el núcleo galáctico. Este flujo, que recuerda, a escala monstruosa, al viento solar que mana del Sol o de otras estrellas, arrastra consigo otros gases interestelares y los expele del núcleo. Las luminosas ondas de choque resultantes se extienden a lo largo de miles de años luz —son comparables al tamaño visible de las propias galaxias—, y se estudian tanto desde observatorios espaciales como terrestres. Algunas de estas galaxias, además, producen chorros de radio: son delgados torrentes de gas en rápido movimiento que, cuando atraviesan un campo magnético anclado quizás en el disco de acreción, emiten ondas de radio.

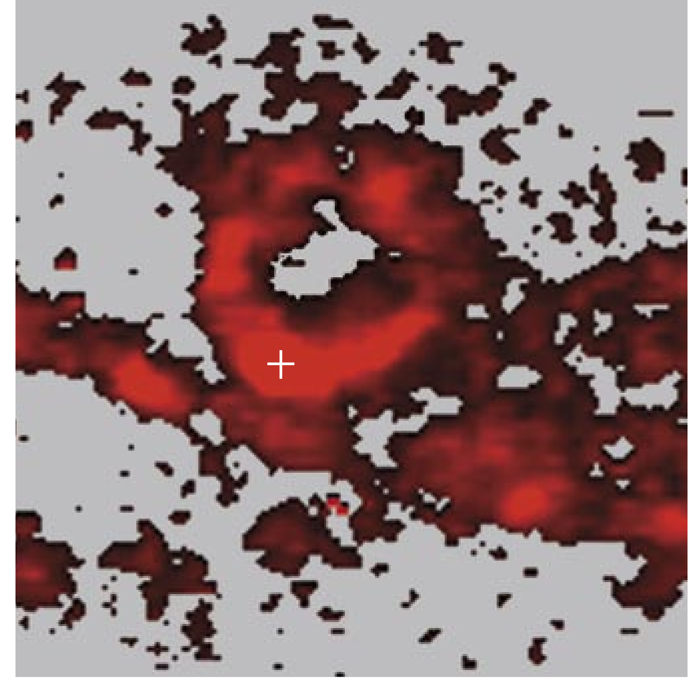
Los agujeros negros no son los únicos motores que producen episodios galácticos violentos. Ciertas galaxias experimentan en sus núcleos breves episodios de formación estelar rápida, los llamados brotes nucleares de formación estelar. Una miríada de nuevas estrellas generan fuertes vientos estelares y, a medida que envejecen, una profusión de supernovas. El gas arrojado por la supernova se mueve a velocidades altísimas, y al chocar contra el polvo y el gas interestelares los calienta hasta varios millones de grados de temperatura.

La presión de este gas caliente forma una cavidad, como una burbuja de vapor en el agua que hierve. A medida que la burbuja se infla, el gas y el polvo más fríos se acumulan en un caparazón denso del borde de la burbuja, que frena la expansión de ésta. La transición del flujo libre en el interior de la burbuja a casi el estancamiento en sus límites crea una zona de turbulencia fácilmente observable desde la Tierra. Si la energía inyectada en la cavidad adquiere entidad suficiente, la burbuja explotará, saltará del disco gaseoso de la galaxia y dispersará los fragmentos del caparazón y gas caliente por el halo galáctico, e incluso más allá, a miles de años luz del punto de origen.

Roberto Terlevich, del Observatorio Real de Greenwich, y sus colaboradores han llevado a cabo la in-







2. UN BROTE ESTELAR, un estallido súbito de formación de estrellas, podría ser responsable de la actividad de NGC 3079 (*arriba*), aun cuando la galaxia presenta un agujero negro en su centro. Una ampliación del área cercana al núcleo (*cruz blanca*) revela el perfil de una enorme burbuja lanzada al medio interestelar por el calor que emiten las estrellas que se forman en el centro de la galaxia.

vestigación más reciente dirigida a determinar si los brotes de formación estelar son capaces de impulsar por sí solos las emanaciones de gas caliente características de las galaxias activas. En 1985, Terlevich y Jorge Melnick, del Observatorio Europeo del Sur, defendieron que en muchas galaxias de este tipo hay unas estrellas exóticas que denominaron "hornillos" —estrellas extremadamente calientes, con temperaturas superiores a los 100.000 grados, y vientos estelares de gran fuerza. Propusieron la hipótesis de que esas estrellas surgen de forma espontánea cuando se produce un brote de formación estelar en el interior de una región donde abundan elementos químicos pesados, generados por anteriores explosiones de supernova. El equipo de Terlevich sostiene que su modelo explica los espectros y muchas otras propiedades de ciertas galaxias activas.

Las dos hipótesis, la que se funda en el brote de formación estelar y la que se basa en los agujeros negros, parecen plausibles, pero entre ellas existen importantes diferencias a través de las cuales podría descubrirse cuál de los dos mecanismos actúa en una galaxia dada. Un agujero negro convierte en energía hasta un 10 por ciento de la materia que cae en su interior. En cambio, los brotes de formación estelar se nutren de la fusión nuclear, que libera tan sólo un 0,1 por ciento de la masa reactiva; en consecuencia, necesitan una cantidad de materia al menos 100 veces superior, la mayor parte de la cual se acumula en forma de combustible no consumido. A lo largo de la vida de un cuásar alimentado por brotes de formación estelar, la masa total que se acumula en el núcleo de la galaxia podría llegar a ser 100.000 millones de veces la masa del Sol, lo que viene a ser la masa de todas las estrellas de la Vía Láctea.

Cuanto mayor sea la masa cerca del núcleo, más rápidas habrán de orbitar las estrellas. Las observaciones ópticas realizadas desde tierra, de menor nitidez debido al efecto obscurecedor de la atmósfera, no han establecido límites estrictos a la concentración de masa en los centros galácticos. Sin embargo, los radiotelescopios acaban de descubrir un disco de acreción, con un radio interior de medio año luz y una rotación rápida alrededor de una masa del orden de 20 millones de veces la solar, en el centro de una galaxia espiral cercana, la NGC 4258.

Mediante el espectrógrafo instalado en el *Telescopio Espacial Hubble*, varios grupos se dedican a medir la distribución de los movimientos estelares en los núcleos galácticos. La determinación de que el gas presente en el núcleo interno de la galaxia activa M87 se mueve de manera coherente con la existencia de un disco de acreción en torno a un agujero negro ha demostrado la valía de estas técnicas. El instrumento será mucho más eficaz cuando los astronautas lo mejoren en 1997.

Los brotes de formación estelar y los agujeros negros difieren también en los espectros de sus fotones más energéticos. Cerca de un agujero negro, la combinación de un intenso campo magnético y un disco de acreción denso crea un caldo de partículas muy rápidas que, al chocar entre sí y con fotones, generan rayos X y gamma. Por contra, un brote estelar produce la mayor parte de su radiación de alta energía a partir de las colisiones que se producen entre el material arrojado por la supernova y el polvo y gas galáctico circundan-

tes. Estos impactos calientan el gas hasta no más de unos mil millones de grados y, por tanto, no puede producir radiación más energética que los rayos X. El elevado número de rayos gamma que ha detectado recientemente el *Observatorio Compton de Rayos Gamma* procedentes de algunos cuásares apunta a que en sus centros hay agujeros negros [*véase* “Observatorio Compton de Rayos Gamma”, de Neil Gehrels, C. E. Fichtel, Gerald J. Fishman, James D. Kurfess y Volker Schönfelder; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1994].

Una última diferencia entre los agujeros negros y los brotes de formación estelar estriba en las fuerzas que concentran el chorro del gas. Las líneas de campo magnético presentes en el disco de acreción que rodea a un agujero negro dirigen la materia que fluye hacia fuera por el eje de rotación del disco hasta concentrarla en un delgado chorro. Al contrario, el material que expele una burbuja creada en un brote de formación estelar sencillamente sigue el camino de menor resistencia en el medio circundante. En una galaxia espiral, un brote de formación estelar poderoso dispersará el gas en una dirección perpendicular al plano del disco galáctico formado por estrellas y gas, pero el flujo se distribuirá dentro de una región con forma de reloj de arena de boca muy ancha. Los delgados chorros de radio que se extienden a distancias de millones de años luz desde el núcleo de algunas galaxias activas sugieren sin ambigüedad la presencia de agujeros negros.

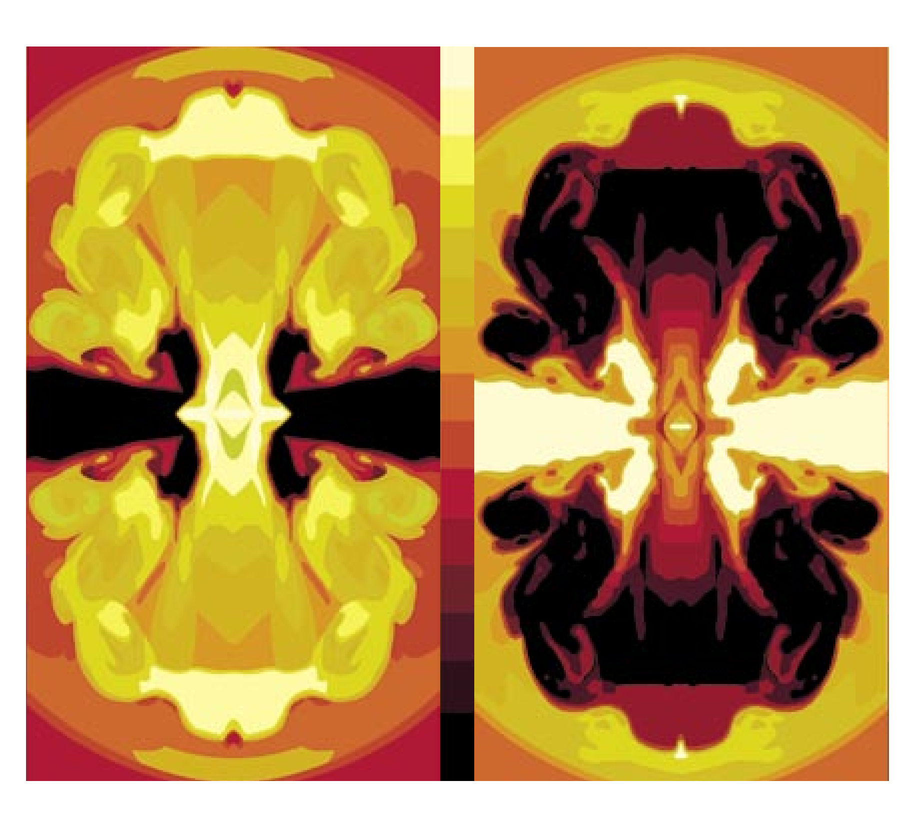
Todo lo que sabemos acerca de las galaxias —sean activas o de otra naturaleza— lo sabemos gracias a la radiación que emiten. Nuestras observaciones proporcionan los datos con los que los astrofísicos eligen entre teorías antagónicas. Nosotros nos hemos concentrado en la luz visible; con ella determinamos las temperaturas, presiones y concentraciones de los diferentes átomos del gas que agitan las explosiones galácticas. Comparamos las longitudes de onda y las intensidades relativas de las líneas de emisión de los átomos excitados o ionizados con las medidas en los laboratorios terrestres o las derivadas mediante cálculos teóricos.

Gracias al corrimiento Doppler, que cambia la frecuencia y la longitud de onda de la luz emitida por fuentes móviles, este análisis también proporciona la velocidad del gas. Cuando el gas se acerca, la luz que emite se corre hacia la parte azul del espectro, y cuando se aleja, se desplaza hacia la roja.

Hasta hace poco, los astrónomos recurrían a dos métodos complementarios para descifrar el comportamiento del gas: la formación de imágenes por líneas de emisión y la espectroscopía de rendija alargada. El primer método produce imágenes a través de un filtro que selecciona luz de una determinada longitud de onda emitida por un elemento, el hidrógeno, por ejemplo. Tales imágenes a menudo revelan, llamativamente, las estructuras filamentosas que dejan las explosiones, pero no dan indicios al observador sobre la velocidad o la dirección de los movimientos del gas: el filtro no discierne con tanta precisión que se puedan medir los corrimientos al rojo o al azul. Los espectrómetros de rendija alargada, que dispersan la luz en los colores que la componen, aportan una información muy detallada sobre los movimientos del gas, pero cubren tan sólo una región diminuta.

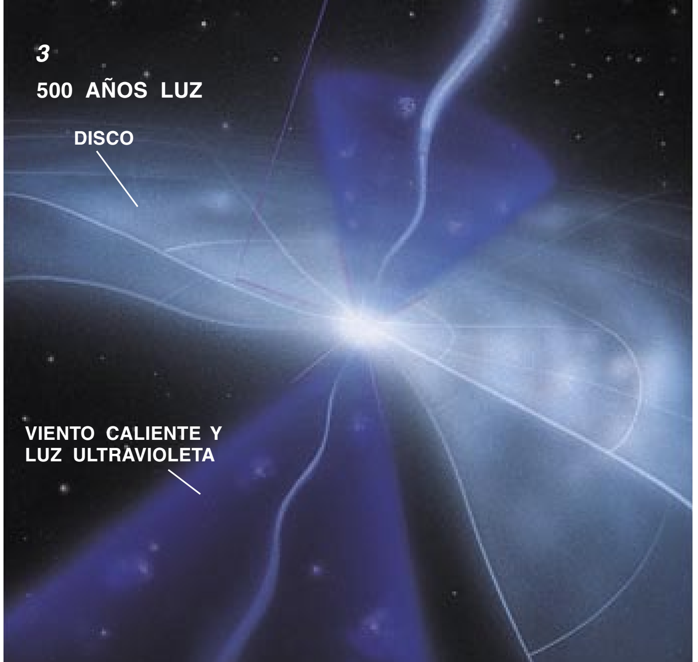
SYLVAIN VEILLEUX, GERALD CECIL y JONATHAN BLAND-HAWTHORN empezaron a trabajabar juntos tras coincidir en los observatorios de Hawai. Veilleux enseña astronomía en la Universidad de Maryland. Cecil, que hace lo propio en la de Carolina del Norte en Chapel Hill y es director allí del Observatorio Morehead, se doctoró por la Universidad de Hawai. Bland-Hawthorn se halla adscrito al Observatorio Anglo-Australiano de Sydney.

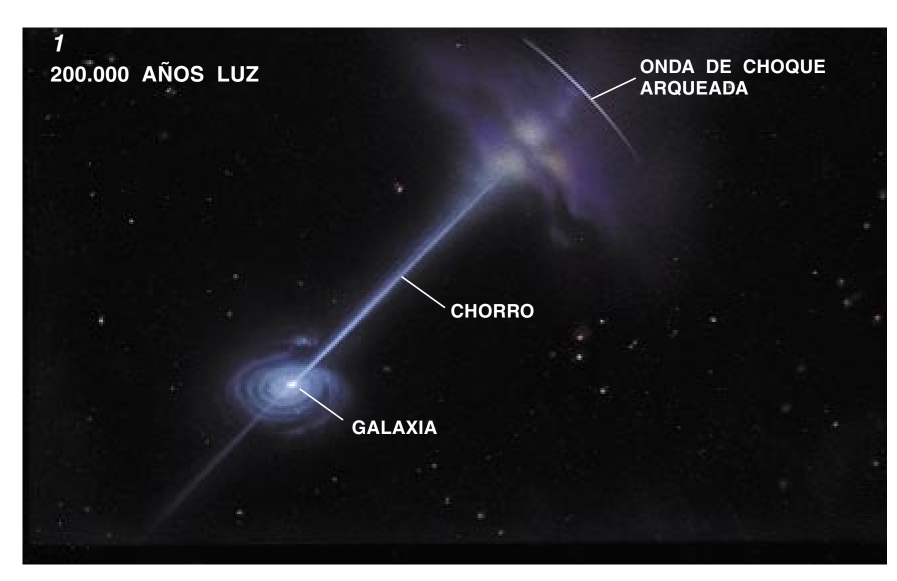
Durante casi diez años nuestro grupo ha venido utilizando un instrumento que combina las ventajas de ambos métodos, descartando los principales inconvenientes de cada uno por separado. El interferómetro Fabry-Pérot de Hawai de formación de imágenes (IFHFI) suministra una información espectral detallada de un amplio campo de visión. Bautizado así en honor de los inventores franceses de principios de este siglo Charles Fabry y Alfred Pérot, estos interferómetros han encontrado un sinfín de aplicaciones en astronomía. El componente esencial es un par de láminas de cristal absolutamente paralelas y separadas por menos de una vigésima de milímetro. Las superficies internas de las láminas son muy reflectantes, y la luz que las atraviesa queda atrapada por las repetidas reflexiones. A medida que las ondas de la luz rebotan de una lámina a la otra, la interferencia destructiva va



3. LA EMANACION DE GAS se vuelve turbulenta muy rápidamente en esta simulación por ordenador de una galaxia activa alimentada por un brote de formación estelar. Un mapa de temperaturas (*izquierda*) refleja cómo el gas caliente que emana del núcleo desplaza el gas galáctico, más frío. La onda de choque resultante aparece con toda nitidez en el mapa de densidad del gas (*derecha*).







4. LAS FUERZAS COLOSALES que operan en el centro de una galaxia activa se hacen sentir a medio millón de años luz o más de distancia a medida que llegan al medio intergaláctico chorros de gas que se desplazan a velocidades relativistas y crean enormes ondas de choque (*1*). Más cerca del centro de la galaxia (*2, 3*), un denso disco ecuatorial de polvo y gas molecular inyecta materia en el núcleo activo mientras se produce un desbordamiento de gas caliente y radiación por los polos. La elevada densidad del gas que cae en una zona de varias docenas de años luz alrededor del centro genera un brote de formación estelar (*4*). Aún más próximo al centro (*5*), el disco, que emite en longitudes de onda del ultravioleta y rayos X, se afila hacia dentro y alimenta lo que se cree es un agujero negro, con millones de masas estelares pero tan pequeño que resulta invisible a esta escala.

atenuando las de cualquier longitud de onda menos una concreta, determinada por esa separación tan precisa entre las láminas. Mediante el ajuste de la separación de las láminas se produce una serie de imágenes, en esencia una sucesión de espectros, que el interferómetro obtiene en cada una de las posiciones del campo de visión.

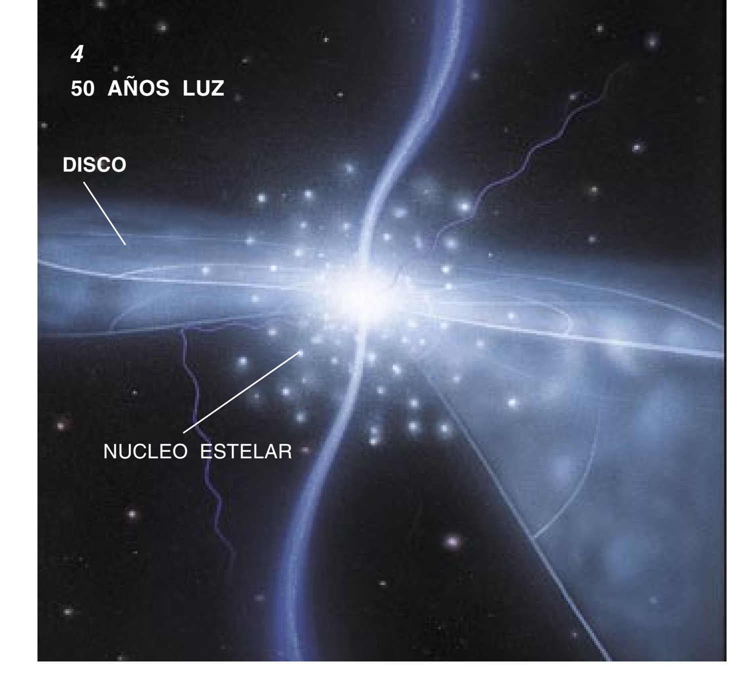
El IFHFI toma sus imágenes desde la cima del volcán inactivo Mauna Kea, a más de 4000 metros de altura, por medio del telescopio de 2,2 metros de la Universidad de Hawai y del Canadá-Francia-Hawai, de 3,6 metros. Gracias a la suavidad del flujo del aire en la cima, las imágenes presentan una notable nitidez. Los CCD (o dispositivos de acoplamiento de carga), muy estables y sensibles a la luz débil, recogen los fotones. En una sola noche, esta poderosa combinación puede generar hasta un millón de espectros a lo largo y ancho de una galaxia entera.

Hemos utilizado el IFHFI para explorar la galaxia espiral activa NGC 1068, situada a 46 millones de años luz de distancia. Por tratarse de la galaxia de este tipo más cercana y de mayor luminosidad de las que pueden observarse en el hemisferio norte, se ha estudiado con particular minuciosidad. En radio, NGC 1068 se asemeja a un cuásar en miniatura: dos chorros se extienden unos 900 años luz desde el núcleo, y hay otras emisiones difusas, procedentes de regiones más exteriores. Es muy probable que la emisión producida por el plasma gaseoso que se desplaza a velocidades relativistas cree los chorros de radio, y que los "lóbulos de radio" se generen en aquellos puntos donde el plasma se encuentre con materia del disco galáctico. Como si fuera un avión supersónico, el borde de ataque del chorro que está al noreste produce un frente de choque con forma de V.

Estas mismas regiones también emiten grandes cantidades de luz visible y ultravioleta. Hemos hallado, sin embargo, que sólo un 10 por ciento de la luz proviene del núcleo. Otro 5 por ciento procede del gas del disco galáctico que se ha ido apilando sobre el borde en expansión del lóbulo de radio del noreste. El resto se debe a dos abanicos de gas que se desplazan muy rápidamente desde el centro hacia el exterior a velocidades de hasta 1500 kilómetros por segundo.

El gas, que fluye hacia fuera formando dos regiones cónicas, está compuesto probablemente por densos filamentos de materia, arrastrados por el viento caliente generado en el disco de acreción. El eje de los conos del viento que fluye hacia el exterior está inclinado respecto al plano de la galaxia, pero no apunta hacia los polos.

Los efectos de la actividad que se desarrolla en el núcleo se extienden





hasta abarcar distancias de varios miles de años luz, mucho más allá de donde se sitúan los lóbulos de radio. El gas interestelar difuso tiene temperaturas insólitamente altas, y una parte considerable de los átomos ha perdido al menos un electrón y se ha ionizado. Al mismo tiempo, los fenómenos que se registran en el disco parecen influir sobre el núcleo. Las imágenes tomadas en el infrarojo revelan una franja alargada de estrellas, que se prolonga más de 3000 años luz desde el núcleo. Las mediciones de velocidad realizadas por el IFHFI sugieren que esa franja distorsiona la órbita circular del gas en el disco y canaliza el material hacia el centro de la galaxia. Esta corriente de materia hacia el interior podría alimentar el agujero negro.

En el núcleo de una de las galaxias más cercanas a nosotros, la M82, situada a pocos años luz de distancia, hay otra explosión gigantesca. A diferencia de lo que ocurre en NGC 1068, parece que se trata de un caso típico de cataclismo causado por un brote de formación estelar. Las imágenes tomadas a través de un filtro que deja pasar la luz roja de los átomos de hidrógeno en formación muestran una red de filamentos que se extiende hacia fuera por los polos galácticos. Nuestros conjuntos espectrales de la emisión de los filamentos perpendiculares al disco galáctico revelan dos masas principales de gas, una en recesión y la otra que se aproxima. La diferencia de velocidad entre ambas aumenta con el corrimiento del gas desde el núcleo hacia el exterior; alcanza unos 350 kilómetros por segundo a una distancia de 3000 años luz. Si tomamos una distancia de 4500 años luz desde el núcleo, veremos que la diferencia de velocidades disminuye.

El núcleo de M82 experimenta un intenso brote de formación estelar, posiblemente originado por un encuentro orbital reciente con sus vecinas M81 y NGC 3077. Su luminosidad en el infrarrojo es 30.000 millones de veces la luminosidad total del Sol, y los radioastrónomos han identificado los restos de un gran número de supernovas. La red de filamentos visible desde Tierra se debe a dos burbujas alargadas que están orientadas aproximadamente en dirección perpendicular al disco de M82, a horcajadas sobre el núcleo. Los observatorios espaciales de rayos X han detectado el viento caliente que infla las burbujas; su apariencia espumosa se debe seguramente a las inestabilidades que se producen en el gas caliente a medida que se enfría.

Pero la identificación de una fuente principal de energía en las galaxias activas no siempre resulta tarea tan sencilla. A veces, parece que un brote de formación estelar coexiste con un agujero negro. Lo mismo que M82, muchas de estas galaxias brillan anormalmente en las longitudes de onda del infrarrojo y abundan en gas molecular, la materia prima de las estrellas. La emisión de radio y los espectros visibles semejantes a los de un cuásar sugieren, sin embargo, que podría también haber un agujero negro.

La interpretación del comportamiento de la galaxia cercana NGC 3079 padece de esa ambigüedad. A esta galaxia espiral se la ve casi de canto desde la Tierra, lo que supone un punto de mira excelente para estudiar el gas expelido desde su núcleo. Al igual que M82, NGC 3079 registra un brillo anormal en el infrarrojo, y también contiene un gran disco de gas molecular, que cubre 8000 años luz alrededor de su núcleo. A la vez, el núcleo tiene un brillo insólito en las longitudes de onda de radio, y la forma lineal de las regiones radioemisoras próximas al núcleo sugiere la existencia de un chorro colimado hacia el exterior. A una escala mayor, la pauta de la emisión en radio es compleja y se extiende a lo largo de más de 6500 años luz a cada lado del disco galáctico.

Las imágenes tomadas en luz roja de hidrógeno muestran un anillo casi circular de 3600 años luz de diámetro, justo al este del núcleo; las medidas de la velocidad realizadas con el IFHFI confirman que el anillo marca el borde de una burbuja, vista de costado. La burbuja tiene forma ovoide; su extremo más puntiagudo está en equilibrio sobre el núcleo y el eje longitudinal se alinea con el polo galáctico. Hay otra burbuja al oeste del núcleo, pero permanece escondida casi por completo tras el disco galáctico de polvo.

Por lo que nuestras observaciones espectrales revelan, la energía total de esa emanación violenta vendría a decuplicar la de las explosiones de NGC 1068 o M82. La alineación de la burbuja a lo largo del eje polar de la galaxia anfitriona implica que la colimación de la emanación se debe al polvo y el gas galácticos, no a un agujero negro central. Con todo, las observaciones respaldan la hipótesis de que NGC 3079 contiene un agujero negro de gran masa en su núcleo.

¿Es el brote violento de formación estelar el único agente responsable de esta explosión de proporciones tan gigantescas? Hemos intentado dar respuesta a este interrogante analizando la radiación infrarroja que proviene de la zona del brote estelar. La mayor parte de la radiación que emana de las jóvenes estrellas sumergidas en las nubes moleculares es absorbida y emitida de nuevo en el infrarrojo, por lo que la luminosidad infrarroja del núcleo de NGC 3079 podría ser un buen indicador de la velocidad a la que las supernovas y los vientos estelares inyectan energía en el centro de la galaxia. Cuando comparamos las predicciones del modelo de brote estelar con nuestras observaciones, vimos que la materia arrojada por las estrellas parece disponer de la energía suficiente para inflar la burbuja. Pese a que la presunta existencia de un agujero negro en el centro de NGC 3079 pueda contribuir a la emanación, no hay necesidad de considerarlo la fuente de energía.

Aunque ya se conocen los principios básicos de los mecanismos que aportan energía a las galaxias activas, todavía quedan por descifrar numerosos detalles. Se debate con vigor sobre la naturaleza de los procesos que desencadenan un brote de formación estelar o crean un agujero negro. ¿Cuál es la cinta transportadora que se ocupa del trasvase de combustible hasta el núcleo puntiforme? Es muy probable que las interacciones gravitatorias con galaxias en las que abunde el gas redistribuyan el de la galaxia anfitriona, quizá mediante la formación de una franja de estrellas como la que se detecta en NGC 1068. Las simulaciones por ordenador indican que la franja, una vez constituida, podría ser muy estable [*véase* “Colisiones entre galaxias”, de Joshua Barnes, Lars Hernquist y François Schweizer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre 1991]. (Efectivamente, la franja tiene que ser estable: NGC 1068 no tiene ahora ninguna compañera cercana.)

Los investigadores también están divididos acerca de qué fenómeno se produce primero: el brote nuclear de formación estelar o el agujero negro. Quizás el brote estelar sea una fase inicial en la evolución de las galaxias activas, que termina por desvanecerse y dejar un denso cúmulo de restos estelares que rápidamente se van juntando en un agujero negro dotado de gran masa.

Casi con total seguridad, los anómalos flujos de gas que hemos observado en las galaxias son meros ejemplos, conspicuos, eso sí, de unos procesos frecuentes y más sutiles que afectan a muchas otras galaxias. Abundan las galaxias luminosas en el infrarrojo, y cada vez hay más pruebas de que muchos de esos núcleos también albergan explosiones. Estos acontecimientos pueden afectar profundamente a la formación de estrellas en el entorno de la galaxia. La burbuja de NGC 3079, por ejemplo, está parcialmente estallada por arriba, y quizá se produzca una fuga de materia hacia el halo galáctico exterior o incluso hacia el vasto espacio intergaláctico. Las reacciones nucleares que tienen lugar en la plétora de supernovas desencadenada por el brote de formación estelar aumentan el contenido de elementos químicos pesados del viento caliente. Como resultado, el viento no sólo calentará lo que le rodea, sino que también alterará la composición química del medio.

Es difícil evaluar con exactitud el impacto global de este “baño de burbujas cósmico” en la historia del universo porque sabemos muy poco del estado en que se encuentran las galaxias lejanas. Las imágenes que de éstas toma el *Hubble* contribuirán a esclarecer algunas de esas cuestiones. Lo que vemos cuando la luz emitida por esas galaxias hace miles de millones de años llega a nuestros instrumentos podría ser nuestra propia prehistoria galáctica, desarrollándose en otro lugar del universo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IMAGING SPECTROPHOTOMETRY OF IONIZED GAS IN NGC 1068, Parte 1: KINEMATICS OF THE NARROW-LINE REGION. G. Cecil, J. Bland y R. B. Tully en *Astrophysical Journal*, volumen 355, págs. 70-87, 20 de mayo 1990.

RELATIONSHIPS BETWEEN ACTIVE GALACTIC NUCLEI AND STARBURST GALAXIES. Actas del Congreso de Astrofísica en Tapei, 1991. Dirigido por Alexei V. Filippenko. Astronomical Society of the Pacific, 1992.

THE NUCLEAR SUPERBUBBLE OF NGC 3079. S. Veilleux, G. Cecil, J. Bland-Hawthorn, R. B. Tully, A. V. Filippenko y W. L. W. Sargent, en *Astrophysical Journal*, Parte I, vol. 433, págs. 48-64, 20 de septiembre 1994.

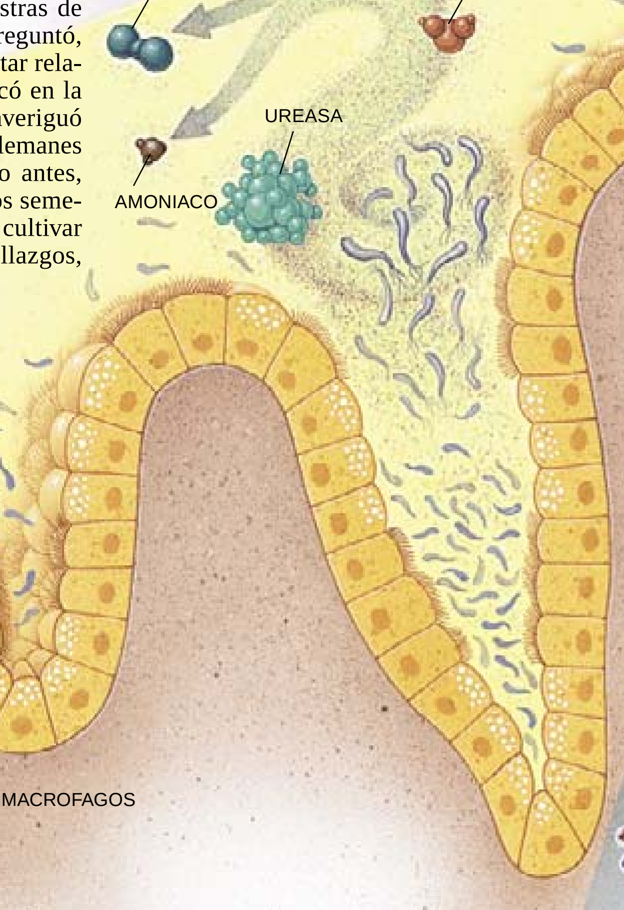
DISSECTING COSMIC EXPLOSIONS. R. B. Tully, J. Morse y P. Shopbell en *Sky and Telescope*, vol. 90, n.º 1, págs. 18-21, julio 1995.

Origen bacteriano de la úlcera de estómago

Entre una mitad y un tercio de la población mundial lleva en su estómago una bacteria "lenta", Helicobacter pylori, *que infecta la mucosa gástrica y causa úlceras y cáncer*

Martin J. Blaser

En 1979 J. Robin Warren, patólogo del hospital australiano de Royal Perth, hizo una observación sorprendente. Al examinar las biopsias de estómago practicadas a determinados pacientes advirtió que en muchos casos las muestras contenían un número elevado de bacterias curvadas o espiriformes. Lo normal es que el ácido del estómago destruya este tipo de microorganismos, antes de que se asienten en la mucosa gástrica. Pero las bacterias que Warren veía estaban alojadas por debajo de la espesa capa de moco que recubre la superficie del estómago y la protege del ácido. Warren comprobó también que las bacterias aparecían en muestras de tejido hinchado. Tal vez, se preguntó, los microorganismos podrían estar relacionados con la irritación. Buscó en la bibliografía algunas pistas y averiguó que ciertos anatomopatólogos alemanes habían descubierto ya, un siglo antes, la presencia de microorganismos semejantes. Pero al no conseguir cultivar *in vitro* las bacterias, sus hallazgos,



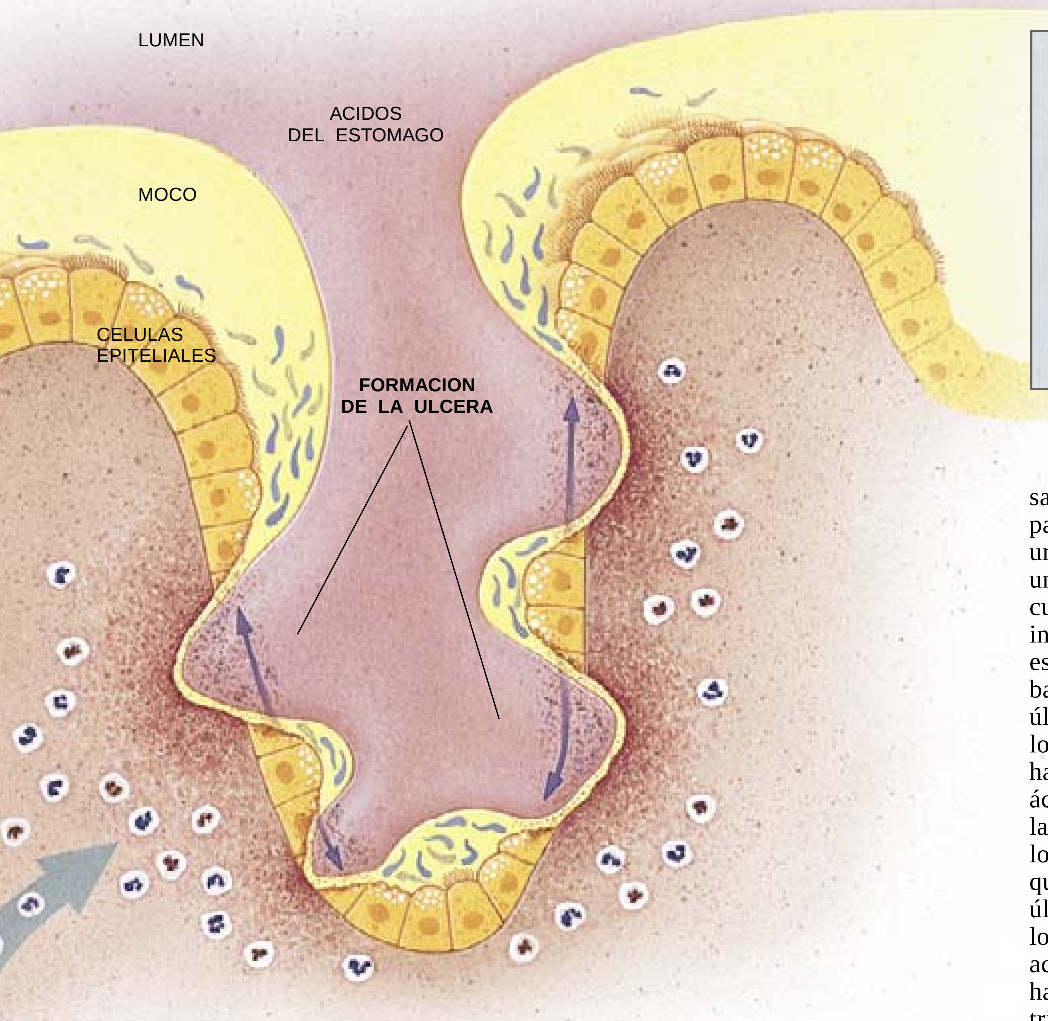
1. *HELICOBACTER PYLORI*, BACTERIA CAUSANTE DE LA ÚLCERA gástrica, vive en la capa mucosa (*amarillo pálido*) que tapiza la superficie del estómago. Allí está parcialmente protegida del medio ácido del estómago (*rosa*). Segrega proteínas que interaccionan con las células epiteliales del estómago y atraen macrófagos y neutrófilos, células causantes de inflamación (*izquierda*). La bacteria produce, además, ureasa, una enzima que descompone la urea en amoniaco y dióxido de carbono; el amoniaco puede neutralizar el ácido del estómago (*centro*). *H. pylori* segrega también toxinas que contribuyen a la formación de úlceras de estómago (*derecha*). Los microorganismos se acumulan preferentemente en las regiones que se indican en el recuadro de la derecha.

MARTIN J. BLASER ocupa la cátedra Addison B. Scoville y dirige la división de enfermedades infecciosas de la Universidad Vanderbilt. Titular de varias patentes y miembro de numerosas sociedades científicas, forma parte del consejo asesor de diversas revistas científicas.

ignorados, quedaron pronto relegados al olvido.

No le fue fácil a Warren, ni siquiera con el entusiasmo de su joven colaborador Barry J. Marshall, hacer crecer aquellas bacterias desconocidas. Comenzaron a trabajar en 1981. Un año después, habían intentado, sin éxito, conseguir cultivos a partir de muestras obtenidas de unos treinta y tantos pacientes. Llegaron las vacaciones de pascua de 1982. El personal del laboratorio había dejado incubando inadvertidamente algunas de las placas; así permanecieron cinco días, en vez de los dos habituales. En la quinta jornada aparecieron las colonias. Por su semejanza con las bacterias patógenas del género *Campylobacter* que se encuentran en el tracto intestinal, llamaron al nuevo microorganismo *Campylobacter pyloridis*. A principios de 1983 Warren y Marshall publicaron los primeros datos, y pocos meses después otros científicos lograban aislar tales bacterias. Vieron que, en efecto, no encajaban dentro del género *Campylobacter*, por lo que acuñaron para el nuevo género el término de *Helicobacter*. Se confirmó, además, el hallazgo inicial de Warren: la infección de *Helicobacter pylori* iba frecuentemente asociada a una inflamación persistente del estómago denominada gastritis superficial crónica.

Esta relación planteaba nuevos interrogantes. ¿Era la inflamación la que propiciaba la colonización del tejido por *H. pylori*? ¿Eran acaso los microorganismos los causantes de la inflamación? La verdad se escondía en la segunda hipótesis. En uno de los estudios, dos voluntarios —Marshall incluido— llegaron a ingerir los microorganismos. Ambos tenían un estómago sano y ambos desarrollaron una gastritis a consecuencia de la ingestión. Cuando los animales de experimentación ingerían *H. pylori*, también se producía una gastritis. En otras investigaciones, los antibióticos suprimieron la infección y se alivió la irritación. Si se erradicaban los microorganismos, la inflamación desaparecía, pero si la infección recidivaba, también lo hacía la gastritis. Sabemos hoy que casi todas las personas infectadas con *H. pylori* adquieren la gastritis superficial crónica. Si no se trata, infección e inflamación se prolongarán decenios e incluso durante toda la vida. Más aún, esta afección puede terminar en úlcera de estómago o de duodeno, el tramo de intestino situado a continuación del estómago. *H. pylori* puede ser también la causante de varias formas de cáncer de estómago.



Cuarenta años atrás, los médicos sabían que la mayoría de la gente que padecía úlcera gástrica también tenía una gastritis superficial crónica. Por una serie de razones, sin embargo, cuando se estableció el nexo entre infección por *H. pylori* y gastritis, los especialistas no pensaron en que esta bacteria podría ser la causante de la úlcera gástrica. Durante generaciones a los alumnos se les enseñó que el estrés hacía que el estómago produjera más ácido, y que éste, a su vez, generaba la úlcera. Esta teoría se apoyaba en los trabajos del alemán K. Schwartz, quien, en 1910, tras advertir que las úlceras de duodeno sólo aparecían en los individuos con acidez de estómago, acuñó el aforismo “No hay ácido, no hay úlcera”. Aunque la acidez gástrica es necesaria para que se forme una úlcera, no basta para explicar su aparición; la mayoría de los pacientes con úlcera tienen cantidades de ácido en el estómago dentro de los límites normales, y algunas personas, en las que se rebasan con creces esos límites, jamás adquieren una úlcera.

Sin embargo, la tesis de la vinculación de la acidez al estrés de la úlcera ganó predicamento en los años setenta, cuando se empezaron a administrar agentes eficaces para reducir la acidez gástrica. Muchos pacientes se vieron, por fin, libres de dolor mientras tomaban esta medicación basada en bloqueantes del

Cobayas humanos

Barry J. Marshall, del hospital australiano de Royal Perth, saltó a los titulares de la prensa cuando anunció que en 1985 había ingerido la bacteria *Helicobacter pylori*. Marshall esperaba demostrar que ésta provocaba la úlcera de estómago. Marshall contrajo, en efecto, una gastritis grave, aunque la dolorosa inflamación desapareció sin tratamiento.

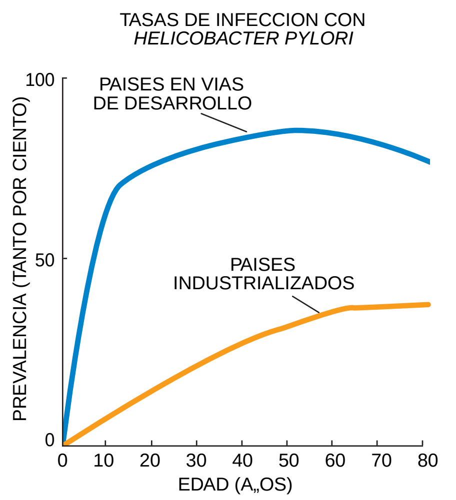
Dos años después Arthur J. Morris y Gordon I. Nicholson dieron a conocer el caso de otro voluntario menos afortunado. El joven, de 29 años, presentó signos de infección durante 10 días, pero las alteraciones se prolongaron más tiempo. El día 67, a partir del comienzo de la infección, el voluntario comenzó un tratamiento con subsalicilato de bismuto (Pepto-Bismol). Tras practicarle, al cabo de cinco semanas, una biopsia se comprobó que la medicación había hecho efecto. Pero una segunda biopsia realizada nueve meses después reveló que la infección y la gastritis habían recidivado. Sólo cuando recibió dos antibióticos diferentes, además de subcitrato de bismuto, su infección remitió tres años más tarde.

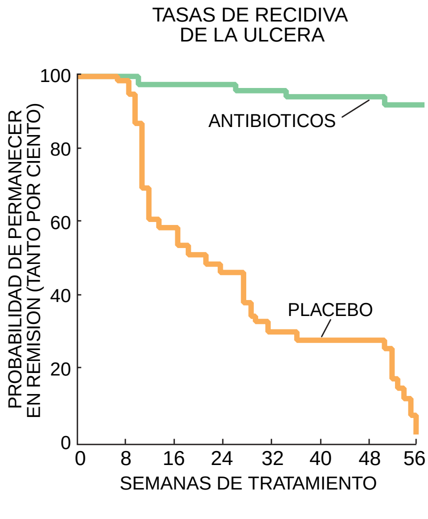
receptor 2 de la histamina (bloqueantes de los receptores H_2). Estos fármacos conseguían a menudo curar la úlcera directamente. Pero solía volver la úlcera si se interrumpía la medicación. Por ello los pacientes se veían obligados a tomar durante años bloqueantes de los receptores H_2. Dada la incidencia de la enfermedad ulcerosa —entre el 5 y el 10 por ciento de la población mundial la sufre en algún momento de su vida—, no sorprende que los bloqueantes de los receptores H_2 se convirtieran en fármacos lucrativos. Las principales compañías farmacéuticas mostraban poco entusiasmo a la hora de explorar o promover modelos alternativos de la enfermedad de la úlcera gástrica.

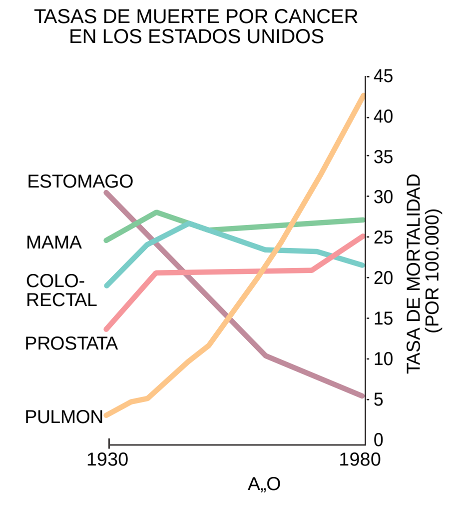
Cierto es que la medicación con agentes antiinflamatorios no esteroideos (la aspirina entre ellos), que se indica para tratar la artritis crónica, puede provocar úlceras. Pero ahora todos los datos indican que *H. pylori* es la causante de la mayoría de los casos de úlcera de estómago no vinculados a la medicación. En los Estados Unidos, por ejemplo, casi todos los pacientes con úlcera de estómago están infectados con *H. pylori*, frente al 30 por ciento de controles de edades paralelas. La bacteria se halla presente en casi todos los individuos con úlcera de duodeno. Está demostrado que la infección con *H. pylori* y la gastritis crónica multiplican por 12 el riesgo de que se desarrolle una úlcera de estómago en el intervalo temporal comprendido entre 10 y 20 años desde la infección. Y lo que reviste mayor interés: la medicación antimicrobiana puede curar la infección de *H. pylori* y la gastritis, reduciendo de manera notable la probabilidad de que reaparezca la úlcera. Son muy pocas, sin embargo, las personas que pueden liberarse de la infección de *H. pylori* sin la medicación antibiótica específica.

Cuando alguien se expone a la infección por *H. pylori*, el sistema inmunitario reacciona produciendo antibióticos, moléculas que pueden unirse y anular algunos de los invasores. Estos anticuerpos no pueden eliminar las bacterias, aunque el análisis de su sangre revela la presencia de anticuerpos, lo que simplifica mucho la detección de la infección. Estudios epidemiológicos muestran que entre un tercio y la mitad de la población mundial es portadora de *H. pylori*. En Estados Unidos y en Europa occidental, no suele darse la infección en los niños, pero más de la mitad de los mayores de 60 años portan tales bacterias. Por contra, del 60 al 70 por ciento de los niños de países en vías de desarrollo dan una prueba positiva hacia los 10 años, y la tasa de infección sigue siendo alta en los adultos. La infección con *H. pylori* aparece también con frecuencia entre los niños internados.

No se acaba de conocer la vía por la que estos microorganismos transitan de una persona a otra. Es innegable que la falta de higiene y el hacinamiento facilitan el proceso. Conforme van mejorando las condiciones de vida







2. LAS TASAS DE INFECCION por *H. pylori* varían bastante de un sitio a otro del mundo. En los países industrializados, la infección es rara en la infancia, aunque su incidencia aumenta con la edad. En los países en vías de desarrollo son más numerosas las personas que se infectan en cualquier grupo de edad (*izquierda*). En apoyo de la tesis según la cual estas infecciones producen la enfermedad ulcerosa, Enno Hentschel y sus colaboradores, del hospital Hanusch de Viena, han observado que el tratamiento antimicrobiano rebaja de una manera drástica la probabilidad de que la úlcera recidive (*centro*). A medida que las tasas de infección han ido descendiendo a lo largo los últimos cien años en los Estados Unidos, también lo han hecho el número de muertes por cáncer de estómago (*derecha*), lo que sugiere que la infección con *H. pylori* también puede causar, en determinadas circunstancias, esta enfermedad.

desciende la tasa de infección y sube la edad media a la que se adquiere. La frecuencia del cáncer gástrico ha caído también en los últimos 80 años. A comienzos del siglo XX constituía la causa principal de muerte por cáncer en la mayoría de los países industrializados. En la actualidad ocupa lugares bastante bajos en la lista. Se desconocen las razones del descenso, pero hay motivos para pensar que la caída experimentada en las tasas de infección de *H. pylori* merece que se le dedique especial atención.

En los años setenta Pelayo Correa, que trabaja hoy en el hospital clínico de la Universidad de Louisiana, propuso que el cáncer gástrico era el resultado de una serie de cambios en el estómago acaecidos a lo largo de un prolongado período. Según el modelo de Correa, un estómago normal sucumbiría inicialmente a la gastritis superficial crónica por razones desconocidas. Ahora sabemos que *H. pylori* es la culpable. En una segunda etapa —de decenios de duración— esta forma de gastritis generaría una lesión más seria, la gastritis atrófica, que desencadenaría nuevos cambios, entre ellos la metaplasia y la displasia del intestino, afecciones que suelen preceder a la aparición del cáncer. El mayor misterio desde el descubrimiento de *H. pylori* se encerraba en la pregunta siguiente: ¿Podrían las bacterias explicar esta segunda transición —de una gastritis superficial a una gastritis atrófica y posiblemente un cáncer— en el modelo de Correa?

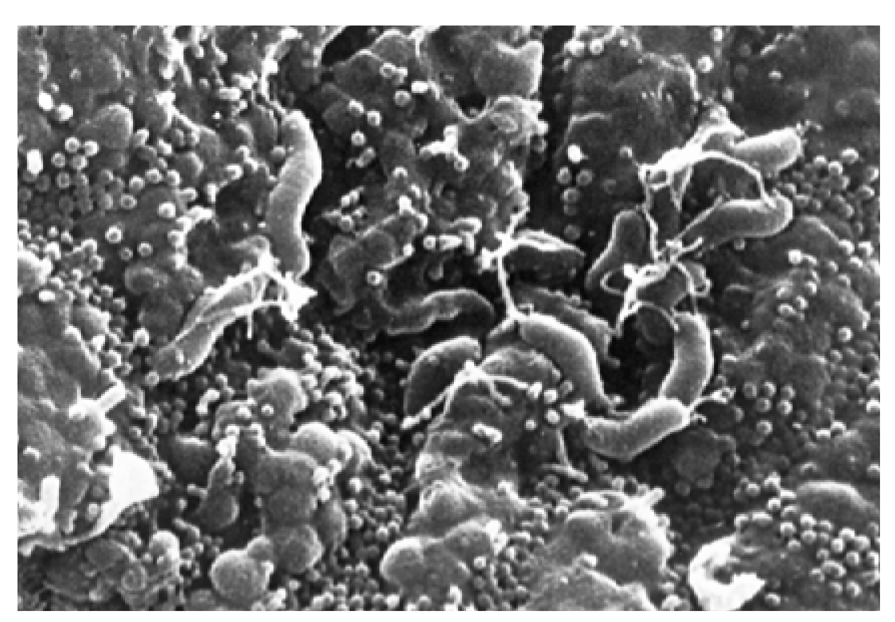
Los primeros datos fiables que relacionaron la bacteria *H. pylori* con el cáncer de estómago procedían de tres estudios independientes, realizados en 1991. En los tres se había seguido un plan parecido y se alcanzaron las mismas conclusiones. En el proyecto en que participé intervino Abraham Nomura, del hospital Kuakini, de Honolulu.

Remontémonos algo más atrás. En 1942, un año después del bombardeo de Pearl Harbor, el ejército norteamericano reclutó a jóvenes de ascendencia japonesa. A mediados de los años sesenta un grupo de expertos examinó un grupo bastante extenso de ellos —los nacidos entre 1900 y 1919— para obtener información sobre epidemiología de enfermedades cardiacas, cáncer y otras afecciones. Hacia finales de ese mismo decenio habían abarcado ya unos 8000 hombres, a los que habían entregado cierto cuestionario y extraído muestras de sangre que se conservaron congeladas. Se hizo un seguimiento clínico de esa población.

Por razones diversas, cuando nosotros comenzamos el estudio disponíamos de información suficiente de sólo 5924 hombres del grupo original. Entre ellos, sin embargo, 137, o sea más del 2 por ciento, habían adquirido cáncer de estómago entre 1968 y 1969. Centramos entonces nuestra atención en 109 de estos pacientes, cada uno de los cuales se pudo comparar con un miembro sano del mismo grupo. Examinamos luego las muestras de sangre congeladas en los años sesenta para así determinar los anticuerpos contra *H. pylori*. Uno de los puntos interesantes de nuestra investigación era que las muestras se habían obtenido unos 13 años, en promedio, antes de que se les diagnosticara cáncer.

¿Existía una correlación real entre infección de *H. pylori* y cáncer de estómago? Sin la menor duda. Los hombres que habían sufrido una infección previa tenían una probabilidad seis veces mayor de contraer cáncer durante el período de seguimiento de 21 años que los que no habían presentado ningún signo de infección. Si, además, restringimos el análisis a los que presentaban cáncer en zonas inferiores del estómago —un área donde *H. pylori* suele acumularse—, el riesgo se multiplicaba por 12.

Los otros dos estudios, dirigidos por Julie Parsonnet, de la Universidad de Stanford, y David Forman, de la Fundación Imperial de Investigación Oncológica de Londres, aportaron resultados similares, aunque las cifras de riesgo eran ligeramente menores. En estos últimos cinco años, nuevas investigaciones epidemiológicas y anatomopatológicas han confirmado la asociación de la infección con *H. pylori* y el cáncer gástrico. En junio de 1994 la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer, perteneciente a la Organización Mundial de la Salud, declaraba que la bacteria *H. pylori* es un carcinógeno de primera clase, lo que lo sitúa entre los agentes tumorales más peligrosos. Un cáncer de estómago poco frecuente, el linfoma gástrico, parece deberse también a *H. pylori*. Datos recientes sugieren que el tratamiento antimicrobiano para curar la infección de *H. pylori* puede producir la regresión de un subgrupo de tumores de este tipo, lo que constituye un avance notable en oncología.

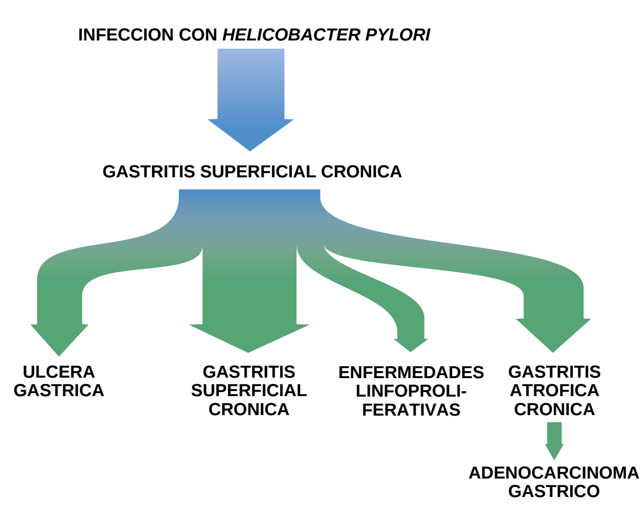


3. LOS MICROORGANISMOS CURVIFORMES, vistos a 8000 aumentos, corresponden a la bacteria *H. pylori* del estómago del segundo voluntario que la ingirió 463 días antes y que, a raíz de ello, sufrió una gastritis superficial crónica.

La mayoría de las bacterias no logran sobrevivir en un ambiente ácido. Con todo, *H. pylori* no es la única excepción. Desde el descubrimiento de esta bacteria, se han aislado otros 11 microorganismos a partir del estómago de primates, perros, gatos, roedores, hurones e incluso guepardos. Estas bacterias, consideradas miembros de la familia de *Helicobacter*, presentan un antepasado común, desarrollan formas en espiral y evidencian una gran movilidad (nadan muy bien), propiedades ambas que las capacitan para resistir las contracciones muscu-

lares que con regularidad vacían el estómago. Alcanzan un crecimiento óptimo con niveles de oxígeno del 5 por ciento, propio de la capa de moco del estómago (el aire ambiental contiene un 21 por ciento de oxígeno). Además, todas estas bacterias sintetizan en abundancia ureasa, enzima que descompone la urea en amoniaco y dióxido de carbono. Uno de los caminos por los que estos microorganismos posiblemente neutralizan el ácido de su entorno sea favoreciendo la producción de amoniaco, con lo que se aseguran aún más la supervivencia.

¿De qué vive *H. pylori*? Suelen aducirse dos respuestas: del moco donde mora y del alimento que ingiere su hospedador. Pero Denis Kirschner, de la Universidad de Texas A&M, y yo hemos construido un modelo matemático que demuestra que *H. pylori* sería incapaz de persistir muchos años si sólo contara con esos nutrientes. En nuestro modelo, las matemáticas de la persistencia en el estómago requieren que se dé alguna interacción regular entre las células del hospedador y las bacterias. La inflamación proporciona una de esas interacciones. He propuesto que *H. pylori* podría desencadenar la inflamación con el propósito de adquirir nutrientes. Una paradoja aparente en la biología del *H. pylori* es que, aunque los organismos no invadan el tejido gástrico, pueden irritarlo. Lo que nosotros y otros hemos encontrado es que los microorganismos liberan compuestos que el tejido gástrico absorbe. Estos compuestos atraen a las células fagocíticas, como leucocitos y macrófagos, que inducen la gastritis.



4. LA INFECCION con *H. pylori* progresa en cuestión de meses hacia una gastritis superficial crónica. Si no se trata, la enfermedad persiste durante toda la vida en la mayoría de las personas. Una pequeña proporción, sin embargo, puede desarrollar una úlcera gástrica, enfermedades linfoproliferativas o una grave gastritis atrófica crónica, que puede desembocar en un adenocarcinoma de estómago.

El hospedador no permanece pasivo mientras *H. pylori* ataca sus tejidos con sustancias nocivas. El organismo humano desencadena una respuesta inmunitaria, en primer lugar fabricando anticuerpos contra la bacteria. Al parecer la respuesta no funciona bien, aunque, a causa de la infección, los anticuerpos coexisten durante decenios. El organismo humano, al verse frente a un agente patógeno difícil de destruir, se encontró con dos opciones que le ofrecía la evolución: luchar contra la infección de *H. pylori* hasta la muerte de ésta, posiblemente aboliendo la función gástrica normal, o hacerse tolerante e ignorar la presencia de los microorganismos. Personalmente creo que la elección se tomó, hace mucho tiempo, en favor de la tolerancia. La respuesta ante otros agentes patógenos persistentes —como los microorganismos causantes de la lepra y de la malaria— pueden seguir el mismo paradigma, en el que las fuerzas de adaptación por parte del hospedador conducen a atemperar la reacción inmunitaria.

Por suerte para nosotros, no es interés de *H. pylori* aprovecharse de esta pasividad, multiplicándose hasta alcanzar números aplastantes y acabar con la vida de su hospedador. Primero, si así lo hiciera, limitaría las posibilidades de propagar la infección. Segundo, en un estado de equilibrio estacionario, *H. pylori* alcanza cifras muy elevadas (de 10^7 a 10^{10} células) en el estómago. Y por último, un crecimiento mayor agotaría los mecanismos que mantienen bajo control el sistema inmunitario, lo que conduciría a una inflamación grave, gastritis atrófica y, finalmente, una pérdida de la acidez gástrica. Cuando la acidez baja, las bacterias del intestino (pensemos en *Escherichia coli*) se mueven libremente contra corriente y colonizan el estómago. Aunque *H. pylori* se desenvuelve mejor en un ambiente ácido y durante períodos más prolongados que *E. coli*, esta bacteria acaba desplazando a *H. pylori* de las zonas más neutras. Así, para evitar cualquier competencia con las bacterias intestinales, *H. pylori* no debe provocar ninguna exacerbación de la inflamación que acabaría alterando los niveles del ácido en el estómago.

¿Son, las bacterias *H. pylori*, simbiontes que sólo recientemente han devenido organismos patógenos? ¿O se trata de viejos patógenos que no han concluido su marcha hacia la simbiosis? Lo ignoramos. Alguna enseñanza, sin embargo, podemos extraer de la biología de *Mycobacterium tuberculosis*, agente de la tuberculosis. También éste infecta a un tercio de la población mundial. Si bien sólo el 10 por ciento de todos los afectados enferman en algún momento de su vida, el 90 por ciento restante no experimentará síntoma alguno. La explicación del fenómeno se reduce a varias categorías principales. Las diferencias entre cepas microbianas o entre los individuos hospedadores podrían dar razón de que unos infectados contraigan la enfermedad y otros no. En el curso seguido por la infección podrían intervenir factores ambientales: alimentación, tabaco, etcétera. A su vez, la edad en que se adquiere la infección podría alterar los riesgos. Cada una de estas categorías afecta al éxito de la infección de *H. pylori*.

Atendamos a las diferencias microbianas. Dado su carácter cosmopolita, no es de extrañar que *H. pylori* presente un notable polimorfismo genético. Las cepas, aunque comparten muchas características estructurales, bioquímicas y fisiológicas, no muestran idéntica virulencia. Las diferencias tienen que ver con variantes en dos genes. Uno codifica una macroproteína que el 60 por ciento de todas la cepas producen. Nuestro grupo de trabajo de la Universidad de Vanderbilt, del que junto conmigo forman parte Murali Tummuru y Timothy L. Cover, y otro de la compañía Biocine en Italia, dirigido por Antonello Covacci y Rino Rappuoli, identificaron y clonaron el gen casi simultáneamente en 1993. Lo denominamos *cagA*. Entre el 50 y el 60 por ciento de los enfermos que padecen exclusivamente gastritis superficial crónica están infectados con cepas de *H. pylori* que portan el gen *cagA*. Sin embargo, en caso de úlcera duodenal casi todos tienen cepas con el gen *cagA*. Recientemente hemos reexaminado el estudio de Hawai y hemos visto que la infección con una cepa *cagA* duplicaba el riesgo de padecer cáncer de estómago. La investigación realizada por Jean E. Crabtree, de Leeds, y por el grupo

¿Qué estrategia debe seguirse en el tratamiento?

	MODELO VIEJO	MODELO NUEVO
CAUSA	El exceso de acidez en el estómago ataca los tejidos y produce inflamación.	La bacteria ***H. pylori*** segrega toxinas causantes de la inflamación del estómago, dando lugar a lesiones de la mucosa.
TRATAMIENTOS	**Dieta suave**, con productos lácteos cada hora, comidas moderadas, sin cítricos o picantes y eliminación del alcohol y la cafeína. **Bloqueantes de los receptores H_2** para rebajar los niveles de histamina circulante, que fomenta la producción de ácido en el estómago. **Cirugía** para extirpar las úlceras que no respondan a la medicación o en las que sea difícil controlar la hemorragia. En los años setenta constituía la intervención más frecuente que realizaban los internos en cirugía. En la actualidad es bastante rara.	**Régimen de antibióticos.** En febrero de 1994 un grupo de estudio del norteamericano Instituto Nacional de la Salud (NIH) recomendó un ciclo de dos semanas de duración para el tratamiento de la úlcera: amoxicilina o tetraciclina, metronidazol (Flagyl) y subsalicilato de bismuto (Pepto-Bismol). En diciembre de 1995 una comisión asesora de la FDA recomendó la aprobación de dos tratamientos de duración de cuatro semanas basados en claritromicina (Biaxin) con omeprazol (Prilosec) o ranitidina-citrato de bismuto (Tritec). Ciclos de una semana suelen resultar bastante eficaces.
EXITO	En los pacientes que interrumpen el tratamiento de bloqueantes de los receptores H_2 se eleva a un **50 %** el riesgo de que recidive su úlcera en el plazo de seis meses. Y a un 95 % la probabilidad de que la úlcera reaparezca dentro de los dos años.	**Las recidivas** desaparecen si se elimina la infección bacteriana subyacente.

de Vanderbilt ha demostrado que las personas infectadas por cepas portadoras del gen *cagA* padecen una inflamación y lesiones hísticas más graves que las infectadas por cepas que carecen de dicho gen.

El otro gen de *H. pylori* que parece influir en la enfermedad codifica una toxina. En 1988 Robert D. Leunk, de Procter & Gamble —fabricantes del subsalicilato de bismuto (Pepto-Bismol)—, dio a conocer que un caldo con *H. pylori* podía inducir la formación de vacuolas en tejidos en cultivo. En mi grupo, Cover había demostrado que una toxina era la causante de estas lesiones y que la producían no sólo las bacterias *H. pylori* de los cultivos, sino también las residentes en humanos infectados. En 1991 purificamos la toxina y confirmamos el hallazgo de Leunk de que sólo entre el 50 y el 60 por ciento de las cepas de *H. pylori* la producen. En un artículo que publicamos en mayo de 1992 dábamos una breve secuencia aminoacídica correspondiente a la toxina madura. Pese a tan exigua información, al cabo de un año eran cuatro los equipos —dos en los Estados Unidos, incluido el nuestro, otro en Italia y un cuarto en Alemania— que habían conseguido clonar el gen, al que todos acordamos denominar *vacA*. En un período de tres meses aparecieron sendos artículos, en revistas diferentes, de los cuatro grupos.

No se solapaban. Cada equipo había resuelto distintos aspectos del problema. Averiguamos, por ejemplo, que la casi totalidad de las cepas de *H. pylori* poseen el gen *vacA*, produzcan o no la toxina cuando se cultivan *in vitro*. También descubrimos que existe una gran variabilidad de una cepa a otra en lo que se refiere a este gen. Además, cuando se inocula directamente en el estómago de ratones el caldo de cultivo en que se ha hecho crecer cualquiera de las cepas productoras de toxinas, se producen en la mucosa alteraciones substanciales. Las cepas que sintetizan la toxina aparecen en los enfermos ulcerosos con una frecuencia entre un 30 y un 40 por ciento mayor que lo que suele ser habitual en los pacientes que sólo tienen gastritis. Las cepas toxigénicas portan por lo común, aunque no siempre, el gen *cagA*, localizado en el cromosoma a bastante distancia del gen *vacA*.

A lo largo de estos últimos 15 años se ha progresado bastante en el conocimiento de la bacteria *H. pylori*. Gracias a ello, han cambiado nuestras ideas sobre la gastritis, que se creía que era una manifestación del envejecimiento del estómago, y también sobre la úlcera gástrica y el cáncer de estómago. Se han introducido nuevos tratamientos y pruebas diagnósticas seriadas. Además, ha surgido un nuevo campo de estudio —el de la microbiología e inmunología del estómago— que sin duda revelará nuevos detalles acerca de las infecciones persistentes en las mucosas.

H. pylori es una bacteria de acción lenta, causante de la úlcera de estómago, un proceso inflamatorio crónico atribuido, no hace mucho, al metabolismo. Se trata, además, de una infección que eleva el riesgo de adenocarcinomas y linfomas. Parece, pues, razonable sugerir que su persistencia podría estar implicada en la etiología de otras enfermedades inflamatorias crónicas de origen desconocido, como la colitis ulcerosa, la enfermedad de Crohn, la sarcoidosis, la granulomatosis de Wegener, el lupus eritematoso sistémico y la psoriasis, así como los carcinomas de colon, páncreas y próstata. Tengo el presentimiento de que *H. pylori* pertenece a una clase de bacterias de acción lenta que podrían explicar algunas de las enfermedades que nos llenan de perplejidad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

REGRESSION OF PRIMARY LOW-GRADE B-CELL GASTRIC LYMPHOMA OF MUCOSA-ASSOCIATED LYMPHOID TISSUE TYPE AFTER ERADICATION OF *HELICOBACTER PYLORY*. A. C. Wotherspoon y cols. en *Lancet*, vol. 342, n.º 8871, págs. 575-577; 4 de septiembre de 1993.

PARASITISM BY THE "SLOW" BACTERIUM *HELICOBACTER PYLORY* LEADS TO ALTERED GASTRIC HOMEOSTASIS AND NEOPLASIA. Martin. J. Blaser y Julie Parsonnet en *Journal of Clinical Investigation*, vol. 94, n.º 1, págs. 4-8; julio de 1994.

El primer ornitorrinco americano

¿Viven todavía mamíferos que posean rasgos mucho más primitivos que los fósiles más antiguos de su misma clase conocidos? Viven. Son los monotremas, que agrupan a ornitorrincos y equidnas

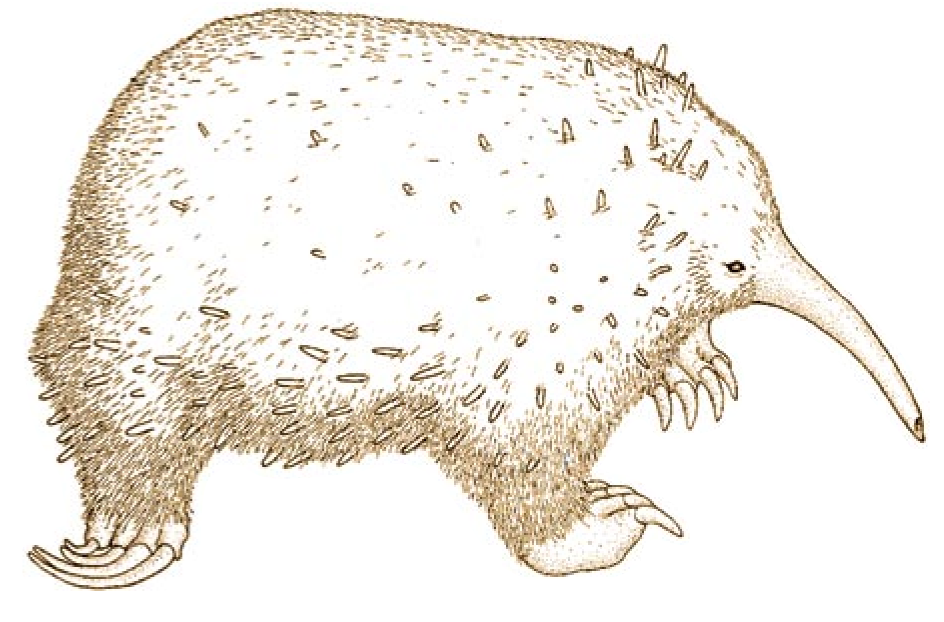
Rosendo Pascual

Los monotremas son mamíferos de reproducción ovípara. Ese y otros caracteres primitivos permiten adentrarse en el origen y evolución ulterior de la clase a la que pertenece el hombre.

Se disputa, de entrada, si dicha clase admite un origen monofilético, defendido por T. Rowe, o polifilético, al que se abona J. R. Wible. Para Rowe, la clase de los mamíferos comprendería el más reciente antecesor común de los monotremas actuales, los terios (marsupiales y placentarios) y todos sus descendientes. Para Wible, en cambio, el límite entre la clase de los mamíferos y sus cercanos parientes extinguidos no es tajante, puesto que sólo 5 de las 91 sinapomorfías cráneo-dentarias usadas por Rowe les son exclusivas. (En sistemática cladística, llámanse sinapomorfías los estados de caracteres derivados que se comparten.) Para otros, así Z. Kielan-Jaworowska, el análisis de los mamíferos más primitivos —del Triásico tardío— muestra que carecemos de base suficiente para excluir la tesis monofilética o la polifilética.

Aunque los hallazgos recientes, en Patagonia, de inesperados mamíferos del Cretácico tardío y del Paleoceno temprano no aportan información directa para resolver el problema del origen de mamíferos, sí han arrojado luz sobre procesos evolutivos relacionados: a finales del Mesozoico e inicios del Cenozoico, los mamíferos más primitivos habían alcanzado en América del Sur una notable diversidad. Se corroboraba con ello la importancia que los fenómenos de aislamiento tuvieron en la persistencia y radiación filética de grupos que, para entonces, se habían extinguido en el resto del mundo.

De forma indirecta, uno de esos descubrimientos del Paleoceno temprano de Patagonia, consistente en el primer monotrema no australiano que aquí tratamos, apoya la tesis según la cual el origen de estos ovíparos resulta decisivo para comprender la evolución de los mamíferos. Además, este hallazgo abre nuevas perspectivas para el conocimiento de la historia general de los mamíferos y la particular de los mamíferos sudamericanos.



Antes de este descubrimiento sudamericano, creíase que taquiglósidos y ornitorrínquidos, las dos familias del orden de los monotremas, eran exclusivos de Australia, Nueva Guinea y Tasmania. Tres especies viven en esas regiones, dos taquiglósidos (*Zaglossus bruijnii*, propio de Nueva Guinea, y *Tachyglossus aculeatus*, de Nueva Guinea, Australia y Tasmania) y un ornitorrínquido (*Ornithorhynchus anatinus*, el platipo, distribuido sobre el lado oriental de Australia y en Tasmania).

También el registro fósil de los monotremas, muy pobre, estaba confinado al continente australiano. El resto más antiguo data del Cretácico temprano (hace unos 105 millones de años) y se trata de una rama mandibular cuyos molariformes presentan los rasgos avanzados básicos que distinguen a los ornitorrínquidos. Se le adscribió a la especie *Steropodon galmani*.

Había un largo hiato entre este primer registro y los que vienen después, que proceden del Oligoceno tardío-Mioceno y pertenecen a la familia viviente de los ornitorrínquidos. Estos segundos están representados por dos especies (*Obdurodon insignis* y *Obdurodon dickisoni*), de sendas localidades australianas. Los subsiguientes restos conocidos de esta familia son del Pleistoceno y del Holoceno y se incluyen en la especie viviente *Ornithorhynchus anatinus*.

Los restos fósiles de los taquiglósidos, por su lado, son aún más escasos y cubren el lapso que va del Mioceno tardío (*Megalibwilia ramsayi*) y Plio-Pleistoceno (*M. ramsayi* y *Zaglossus hecketti*) al Holoceno (*Zaglossus bruijnii* y *Tachyglossus aculeatus*).

Esa era la situación hasta el verano austral de 1990, cuando realizamos una expedición paleontológica con el propósito de buscar más pruebas sobre las relaciones de *Sudamerica ameghinoi*. Habíamos llamado así a

un molar aislado, y de adscripción taxonómica desconocida, hallado en capas del Paleoceno temprano del golfo de San Jorge, en el centro de la Patagonia. Los avanzados caracteres de este molar, incompatibles con los de cualquier grupo de mamíferos conocido de esa antigüedad, con la excepción posible de los edentados ("Edentata"), nos llevaron a considerarlo como una nueva familia ("Sudamericidae") de ellos.

Los estudios de nuevos molares aislados llevaron a Krause y Bonaparte a considerarlo un clado altamente autapomórfico de multituberculados, es decir, con caracteres derivados únicos. Hasta ese momento se tenía a los multituberculados por exclusivos habitantes del hemisferio norte, esto es, Laurasia, durante el lapso Jurásico-Oligoceno. Aunque admitimos su mayor relación con los multituberculados, los caracteres tan derivados de *Sudamerica ameghinoi* nos hicieron sospechar que aquel grupo laurásico, o más probablemente un grupo antecesor, pudo diverger, en América del Sur, hacia grupos que generaron clados distintos, resultantes del aislamiento que sufrió el continente sudamericano desde los albores de su diferenciación.

1. MONOTREMAS ACTUALES. Existen tres especies. *Zaglossus bruijnii*, equidna de pico largo o equidna de Nueva Guinea, mide unos 0,65 metros de longitud promedio (*página precedente*). La longitud promedio de *Ornithorhynchus anatinus*, ornitorrinco, platipo o pico de pato, es de unos 0,50 metros. Por su parte *Tachyglossus aculeatus*, equidna australiano, alcanza unos 0,45 metros de longitud.

Los mamíferos del Cretácico tardío documentados por Bonaparte, también en Patagonia, y muchos de los grupos de marsupiales y "ungulados" nativos del Terciario sudamericano han aportado ejemplos de adquisición y convergencia de nuevos caracteres en aislamiento geográfico. Pensábamos que el hallazgo de fósiles más completos de *Sudamerica ameghinoi* podría desentrañar las relaciones filogenéticas de dicho taxón, así como sobre muchos otros aspectos relativos a la teoría evolutiva, como la que habían ofrecido ya los mamíferos fósiles sudamericanos. Es bien conocida la influencia que ejercieron en Darwin para su teoría de la evolución y en Simpson para su intervención, desde la paleontología, en la configuración del neodarwinismo.

Nuestro esfuerzo se vio recompensado por el descubrimiento de un molar de un mamífero que presentaba caracteres morfológicos singulares. El molar perteneció a un monotrema ornitorrínquido vinculado a la única especie oligo-miocena que se conocía entonces: *Obdurodon insignis*. Su análisis ratificó la similitud morfológica de este molar con los de las especies del género *Obdurodon*, del Oligoceno-Mioceno australiano. De ahí la denominación que le dimos: *Monotrematum sudamericanum*. Un breve repaso de la historia de los mamíferos sudamericanos ayudará a evaluar la trascendencia de este hallazgo.

Durante la mayor parte del período Terciario, aproximadamente entre 63 y 3 millones de años, el continente sudamericano fue insular. Lo corroboran los mamíferos fósiles, que muestran también que el aislamiento se quebró transitoriamente, al menos en tres momentos: hacia fines del Eoceno, manifestado por el ingreso de los roedores y primates, desde Africa; hacia fines del Oligoceno o comienzos del Mioceno, cuando roedores y primates autóctonos emigraron hacia Las Antillas; y hacia fines del Mioceno, cuando se produjo el primer intercambio americano saltando de isla en isla. Fue un movimiento precursor de otros que ya usarían una vía terrestre directa con el surgimiento del "puente panameño" que estableció la conexión interamericana.

No sólo el aislamiento persistente es la causa de la diferenciación de una fauna peculiar de mamíferos durante la mayor parte del Cenozoico, sino que la posición austral del continente contribuyó a dar a su biota un carácter distintivo. Su conexión con la Antártida hasta bien entrado el período Terciario, su subsecuente rotura y escasa deriva hacia el norte imprimieron a su biota un sello polar conjugado con otro ecuatorial. Esta singularidad, que en términos paleobiogeográficos podría definirse como la suma de la

historia de Gondwana oriental con la de Gondwana occidental, alcanzó un grado mayor al establecerse la conexión con América del Norte, permitiendo la incorporación de la biota laurásica, que se fundió a la de ambos continentes gondwánicos. En los mamíferos este episodio final tuvo efectos más ostensibles, ya que la gran mayoría de los taxa vivientes descienden de esos inmigrantes norteamericanos.

Si bien los mamíferos vivientes y fósiles evidencian la historia biogeográfica del continente sudamericano durante los últimos 60 millones de años, apenas se conocían los que debieron habitar en el continente durante los tiempos geológicos precedentes. Aunque todavía no se han registrado mamíferos terrestres del lapso Triásico-Jurásico, ni del Cretácico más tardío y de la primerísima parte del Cenozoico, los recientes hallazgos de restos en capas del Cretácico temprano (Hauteriviano) y del Cretácico tardío (Campaniano), sumados a los del Paleoceno temprano han aportado pruebas sobre la transición Cretácico-Terciario y sobre los mamíferos del Mesozoico.

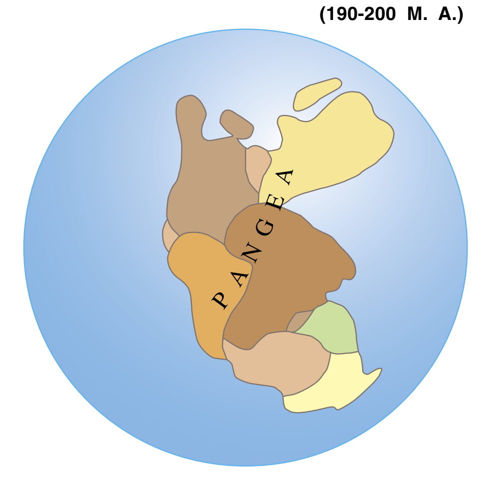
Los mamíferos mesozoicos —por lo menos hasta finales del Cretácico— eran grupos pretribosfénicos, es decir, sin la morfología y oclusión molar coronaria especializadas que distinguen a los terios. Se advierte un elevado grado de endemismo, apoyado en su prolongado aislamiento, roto por esporádicas conexiones. En efecto, algunos dinosaurios indican que hacia fines del Cretácico existió alguna relación con América del Norte, permitiendo lo que parece haber sido el primer intercambio americano de vertebrados terrestres.

Durante el lapso Campaniano tardío-Daniano temprano (ocurrido hace entre 74 y 64 millones de años) debieron de producirse los primeros procesos emigratorios e inmigratorios de mamíferos; con América del Norte los marsupiales y placentarios como actores principales, y con Australia los marsupiales. La ausencia en América del Sur de monotremas entre los mamíferos de fines del Cretácico y su presencia en el Paleoceno temprano apuntan a que ellos también formaran parte del intercambio o expansión geográfica de mamíferos con Australia: los marsupiales desde América del Sur y los monotremas hacia América del Sur austral.

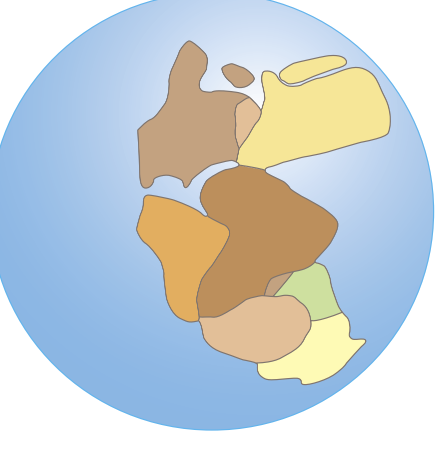
Si bien el extremo austral del continente sudamericano estuvo conectado a la Antártida occidental hasta bien entrado el Terciario —hasta el Oligoceno temprano (hace 35 millones de años), y por esa vía a Australia hasta el Eoceno tardío—, la ausencia de monotremas entre los mamíferos del Cretácico tardío de Patagonia indujo a suponer que el origen y evolución de los mismos era un fenómeno acontecido en Australia.

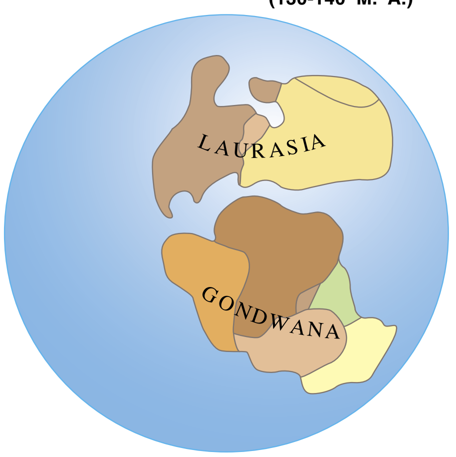
Nuestro hallazgo en el Paleoceno temprano del extremo austral sudamericano ha dado respuesta a algunos interrogantes y planteado otros nuevos. Obliga a un desplazamiento hacia el sur del enfoque de los antecedentes históricos de los mamíferos sudamericanos, que por largo tiempo se centró en la vinculación de éstos con la historia de los mamíferos de América del Norte. El ornitorrínquido de Patagonia es la primera prueba empírica de la relación histórica de los mamíferos australianos y sudamericanos.

Los dientes del ornitorrinco viviente son molariformes, vestigiales y efímeros. La parte anterior del paladar que forma el pico, no tiene ni vestigios de dientes. Las especies de los equidnas, vivientes y fósiles conocidas, carecen de dientes. Sin embargo, las tres especies de ornitorrincos fósiles que se conocían antes de este hallazgo en sedimentos del Paleoceno de Patagonia, particularmente las del Oligoceno-Mioceno de Australia, poseían dos premolares y dos molares permanentes, éstos







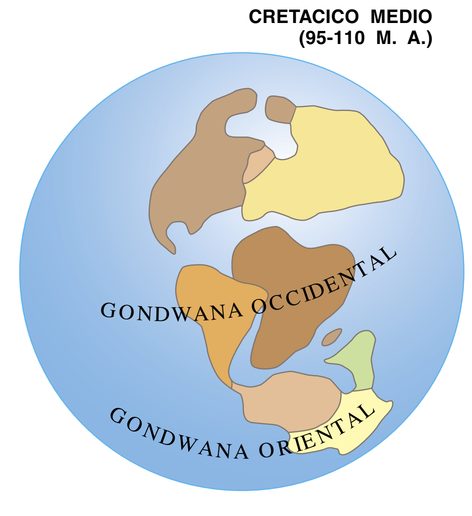


2. FRAGMENTACION DE PANGEA. Por los límites entre el período Triásico y el Jurásico todavía existía una única masa continental, el supercontinente Pangea. Por los tiempos del Jurásico medio significativas separaciones continentales habían ocurrido dentro de Pangea, insinuándose la separación de una gran masa nordecuatorial de otra sudecuatorial. Alrededor del límite Jurásico-Cretácico un gran mar panecuatorial (mar Tethys) separaba dos grandes masas continentales, Laurasia al norte y Gondwana al sur. Por el Cretácico medio la apertura del Atlántico sur había dividido ya el supercontinente Gondwana en dos continentes: Gondwana occidental y Gondwana oriental. El continente sudamericano comenzaba a delinearse. Hacia finales del Mesozoico y comienzos del Cenozoico, América del Sur tuvo también algún tipo de conexión geográfica con América del Norte. No obstante, la apertura de la mayor parte del Atlántico y el comienzo del cierre del mar Tethys habían delineado ya el continente sudamericano. Este lapso del tiempo geológico estuvo caracterizado por extensas ingresiones marinas que “fragmentaron” las masas continentales, modificando muy trascendentemente los ambientes y, al parecer, favoreciendo las migraciones intercontinentales de la biota. Los mapas están basados en otros de Lillegraven.

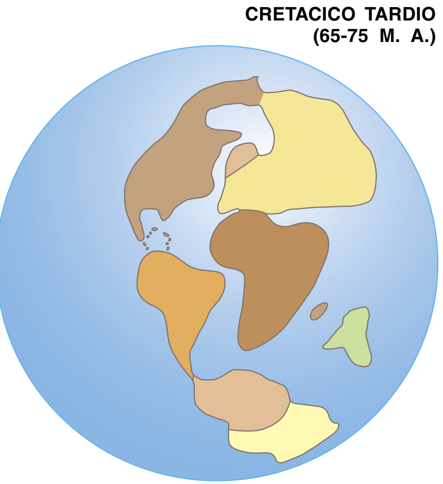
de una morfología similar a la de los molares de la especie viviente, *Ornithorrhynchus anatinus*.

La especie *Obdurodon dicksoni* del Mioceno medio de Australia está representada por un cráneo casi completo y un fragmento del dental. Demuestra que los caracteres osteológicos básicos que diferencian al ornitorrinco viviente de los demás mamíferos estaban ya definidos, aunque en un estado más primitivo. Por ejemplo, poseía dos premolares arriba y abajo, había perdido el tercer molar superior, y el tercero inferior estaba atrofiado; la septomaxila estaba presente, aunque era atrofiada y había perdido el proceso facial del premaxilar. Es decir, que aunque poseía premolares, la ausencia de los dientes anteriores, la persistencia de la septomaxila, la abertura existente entre el proceso rostral de ese hueso y el muy expandido premaxilar, llevaron a interpretar que esa especie tuvo un pico relativamente mayor que el de la especie viviente.

Por su lado, la más antigua especie conocida, *Steropodon galmani*, del Cretácico temprano australiano, presenta en sus molares inferiores las sinapomorfías propias de un ornitorrínquido primitivo, o de un clado de ornitorrínquido muy estrechamente emparentado con el antecesor común del clado *Ornithorhynchus-Obdurodon*. Los molares inferiores de *Steropodon galmani* no son tribosfénicos; pero la similitud de su trigónido con el de los terios y la posesión de un talónido bicuspidado sugieren que los monotremas tienen relaciones filéticas con los terios, más que con otros mamíferos más primitivos.



Los monotremas presentan caracteres craneanos relacionados con el sistema vascular en estado más primitivo que los marsupiales, placentarios y *Vincelestes neuquenianus*, terio primitivo. Kielan-Jaworowska ha destacado el arcaísmo de los monotremas señalando que tienen la cóclea del oído interno curvada, intermedia por tanto entre la cóclea recta de los primitivos mamíferos no terios (multituberculados, triconodontos y docodontos) y la arrollada de los terios, entre los cuales la de *Vincelestes neuquenianus* había alcanzado ya un arrollamiento de unos 270 grados.



Kielan-Jaworowska sugiere que los monotremas se separaron de la línea teria entre el Jurásico medio y el Jurásico tardío; hace, pues, unos 170 millones de años, época que coincide con la división de los supercontinentes Laurasia y Gondwana. Ello no sólo indica que los ornitorrínquidos son los mamíferos vivientes más primitivos, sino que, además, se cuentan entre los mamíferos más primitivos de los grupos extinguidos de la línea a la que pertenecen los marsupiales y placentarios vivientes.

En los efímeros molares del ornitorrinco viviente existe un número de raíces mayor que cuatro; perforan una capa de epitelio, en forma de cuenca, para fijarse en el maxilar y el dentario. Cuando estos dientes se resorben, el epitelio crea una placa córnea que le sirve de batería masticatoria por el resto de su vida. Tal tipo de raíces estuvo presente también en los molares de las especies miocénicas de *Obdurodon*, aunque en ellos cierto desgaste de la superficie masticatoria y el desarrollo de las raíces indican que fueron permanentes, no efímeros, o por lo menos con un uso bastante

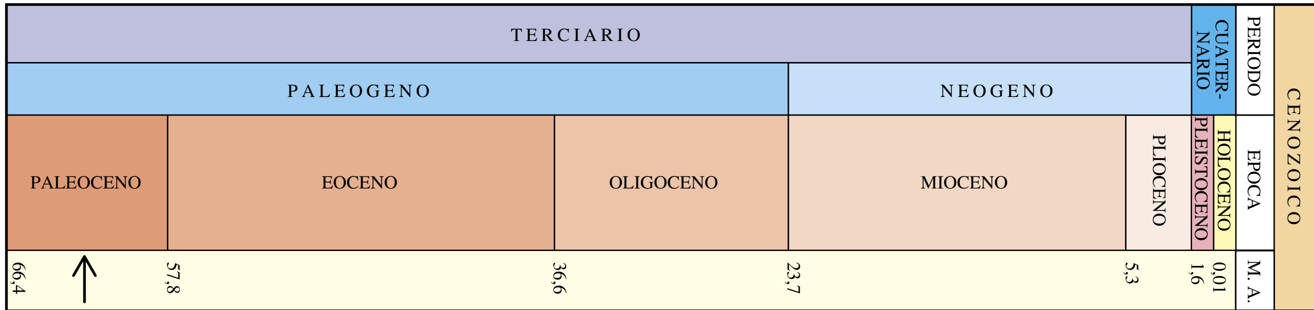
ROSENDO PASCUAL es profesor emérito y jefe del departamento de paleontología de vertebrados de la facultad de ciencias naturales y museo de la Universidad Nacional de la Plata.

prolongado. Esas raíces no responden al tipo conocido en los más avanzados mamíferos, ni por el número ni por su estructura y posición en la base de la corona.

En *Obdurodon insignis* las seis raíces inferiores tienen sus extremos ásperos y terminan en una expansión en forma de botón, como si hubiera tenido una articulación sindesmótica con el dentario. Esta peculiar articulación ha sido considerada por Woodburne y Tedford como una probable modificación de la articulación acrodonta característica de algunos reptiles. Si así fuera, se trataría de un carácter anatomo-funcional reptiliano. Pero podría suceder que éste fuera un carácter de desarrollo secundario, relacionado con la tendencia filogenética a la resorción de los molares, como finalmente ocurrió en el ornitorrinco viviente, donde las reemplazantes placas córneas y el "pico" son los únicos elementos de aprehensión y masticación presentes.

En efecto, en la especie más antigua, *Steropodon galmani*, del Cretácico temprano australiano, las raíces parecen ser normales. En cambio, en la especie del Paleoceno temprano de América del Sur, *Monotrematum sudamericanum*, el nacimiento de las cuatro raíces reconocibles en el molar superior no conserva sus extensiones intraalveolares; no existen tampoco trazas de que se hubieran fracturado después de fosilizadas, es decir, sin las caras de fracturas que usualmente se observan en los dientes aislados, fracturados, de los demás mamíferos. La porción remanente es esponjosa, sin la compacidad que caracteriza a la dentina de las raíces de los terios superiores.

Las coronas de los molares superiores e inferiores de los ornitorrincos del Terciario y de la especie viviente constan de dos lóbulos y dos cíngulos bajos, uno anterior y otro posterior. La mayoría de los lóbulos constan de un par de crestas dispuestas en V abierta, unidas lingualmente las superiores, y labialmente las inferiores. Forman, pues, ángulos invertidos, marginados por numerosas cúspides. La inversión de estos ángulos permite una efectiva



3. CUADRO GEOCRONOLOGICO del lapso en que fueron registrados los monotremados, es decir, la última parte del Mesozoico (Cretácico) y todo el Cenozoico. La flecha señala la antigüedad de *Monotrematum sudamericanum*, el ornitorrínquido fósil sudamericano.

oclusión, como la que se diferenció en los terios superiores durante el pasaje de un diente tritubercular a uno tribosfénico. El vértice de cada ángulo y la terminación de cada una de las crestas componentes llevan sendas cúspides, diferentemente desarrolladas, a las que se agregan en los molares superiores otra prominente en la desembocadura lingual del valle interlobular, y por lo general una o más cúspides menores en cada una de las aberturas de los ángulos; a éstas se suman otras pequeñas en las terminaciones de los cíngulos anterior y posterior. De tal manera, los molares poseen una sucesión de varias cúspides en los márgenes lingual y labial, más numerosas las labiales en los molares superiores y las linguales en los inferiores.

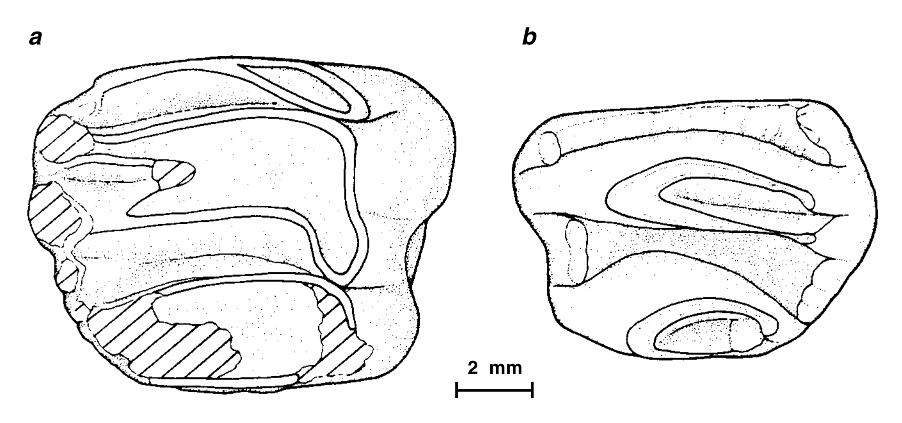
El registro de un cráneo casi completo de *Obdurodon dicksoni*, con rasgos distintivos de ornitorrínquido, apoya la inferencia de Archer y colaboradores de que las especies de este género del Mioceno, a pesar de poseer molariformes funcionales, fueron acuáticos carnívoros, aunque de una dieta basada en animales con exoesqueleto más duro, como el que caracteriza a los artrópodos adultos. Los más blandos estados larvales componen la dieta de la especie viviente.

La correlación de los molariformes con una estructura craneana "ornitorrínquida" nos mueve a pensar que a los molares de *Monotrematum sudamericanum* debió de corresponder un cráneo "ornitorrínquido". Sin embargo, la presencia, en el ejemplar patagónico, de un probable tercer molar y de un más pronunciado desgaste en el único molar conocido parece concordar con un estado temprano del tránsito de una dieta basada en materiales duros a más blandos, asociada a una creciente adaptación a la vida acuática. La litogénesis de los sedimentos portadores de la especie del Paleoceno de Patagonia, el polen en ellos preservado y la abundancia de restos de cocodrilos y tortugas acuáticas sugieren lagunas costeras y manglares, bajo condiciones húmedas y cálidas.

El hecho de que *Steropodon galmani*, de unos 105 millones de años de antigüedad, posea molares con rasgos morfológicos que anticipan los propios de los ornitorrínquidos ejemplifica la más longeva permanencia conocida de una morfología dentaria entre los mamíferos. Además, esa morfología aporta información sobre pautas de evolución que siguieron los mamíferos en el paso del tipo pretribosfénico al tribosfénico.

Steropodon galmani aparenta tener molares inferiores tribosfénicos de terio superior. Sin embargo, Kielan-Jaworowska ha demostrado que los molares inferiores de esa especie carecen de oclusión tribosfénica. Por un lado, esta compleja oclusión no-tribosfénica representa un segundo caso conocido. (El primero es *Shuotherium dongi*, del Jurásico tardío de China.) Ello demuestra que, de los modelos con cúspides dispuestas en triángulo invertido en los molares superiores e inferiores, debieron derivar dicotómicamente tipos similares: tribosfénicos y no-tribosfénicos. Por otro lado, la diferenciación en el Cretácico temprano de ese tipo de morfología dentaria tan evolucionada apoya la hipótesis según la cual los monotremas se separaron de la línea principal teria antes del Jurásico medio.

Entre los más intrigantes problemas de biogeografía histórica se encuentra el reconocimiento de las causas de la singularidad de la biota de la Patagonia. De acuerdo con un reciente análisis, la biota sudamericana tiene un origen híbrido: la del norte guarda relación con la de América del Norte,



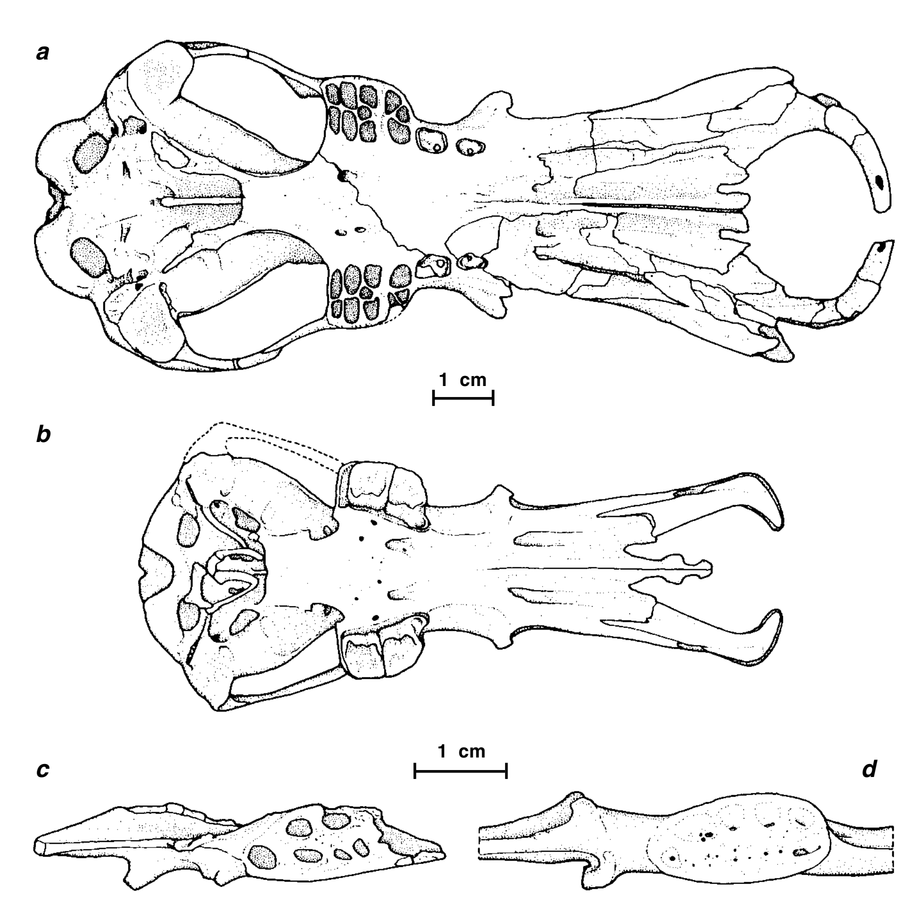
4. CONFRONTACION DEL MOLAR 2 derecho (*a*) e izquierdo (*b*) de *Monotrematum sudamericanum* y *Obdurodon dicksoni*, respectivamente. La parte anterior está arriba, y la lingual a la derecha en *A* y a la izquierda en *B*.

mientras que la del sur constituye un grupo monofilético con la de Australia, Tasmania, Nueva Guinea, Nueva Caledonia y Nueva Zelanda. El patrón de distribución refleja, en ese marco, la existencia de una vieja biota austral.

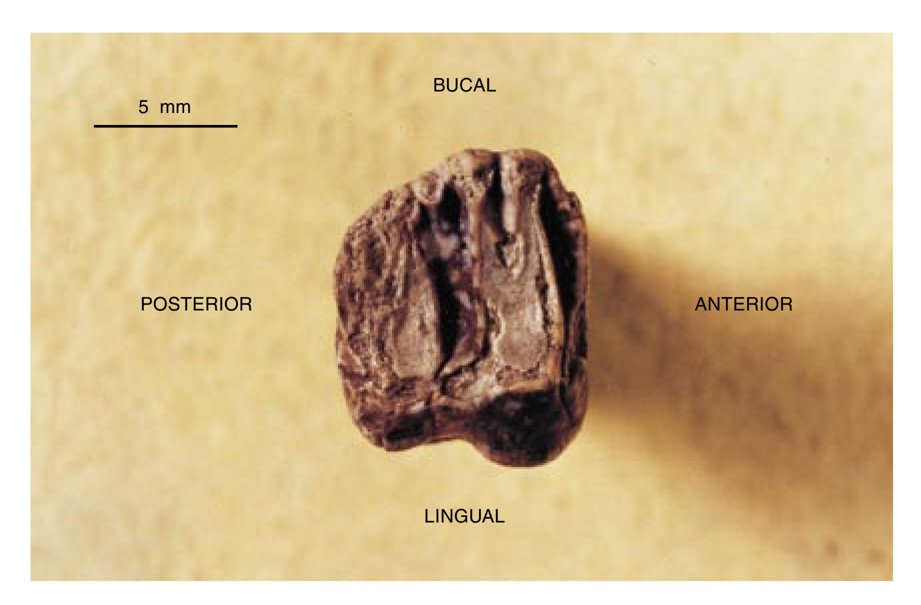
Patagonia, junto con la meseta de las Malvinas y la península Antártica, habría sido parte de una única masa continental, que, hacia finales de la era paleozoica (alrededor de los 250 millones de años), se agregó a lo que devendría el continente sudamericano. Esta acreción aparece como resultado regional de una acreción general de todos los continentes para formar Pangea, supercontinente que habría existido durante todo el período Triásico, hace entre 245 y 208 millones de años. El terrano Patagonia compone la parte austral sudamericana. (Se llaman terranos los fragmentos continentales desprendidos de una primigenia masa y unidos a otras como jirones alóctonos.) La fragmentación de Pangea en el Jurásico tuvo siempre al terrano Patagonia como porción austral de lo que devendría el continente sudamericano, primero como parte del supercontinente Gondwana, luego como parte del continente Gondwana occidental, y, delineado ya en sus rasgos mayores el continente sudamericano, como el apéndice que lo conectaba al continente Gondwana oriental. En resumen, Patagonia mantuvo siempre relaciones geográficas con el continente Antártico y, por su intermedio, con el resto del continente Gondwana oriental hasta que éste inició su fragmentación y deriva.

La apertura del pasaje Drake y las islas asociadas parece que ocurrió hace unos 30 millones de años. Hasta entonces, cadenas de islas como las que actualmente integran la Antártida occidental pudieron haber conectado todavía los continentes sudamericano y antártico. Los testimonios geológicos y paleobiológicos concuerdan en indicar que por lo menos durante el Cretácico más tardío y el Paleoceno más temprano el sur de América del Sur, Antártida occidental, el cratón Antártico, Australia y Nueva Zelanda fueron partes muy contiguas, y por eso con una biota terrestre y marina compartida.

Había, pues, una provincia biogeográfica distinta, la provincia weddelliana (marina) de Zinsmeister. Si aceptamos que Australia no se separó completamente de la Antártida oriental hasta los tiempos que median entre el Eoceno medio y el superior (45-38 millones de años), debemos admitir que hasta mediados del Eoceno hubo intercambio y extensión de la distribución de las biotas terrestres sudamericanas y australianas. El hallazgo, en capas del Eoceno medio de la isla Seymour, de mamíferos terrestres apoya la existencia de una conexión geográfica y continuidad biogeográfica entre la Antártida occidental y Patagonia, por



5. CONFRONTACION DE CRANEOS Y FRAGMENTOS DEL DENTARIO de un ornitorrinco fósil y del actual. En *a* se ilustra una vista palatal del cráneo de *Obdurodon dicksoni Archer* (tomado de un calco del holotipo del Mioceno medio de Australia); en *b*, ídem de *Ornithorhynchus anatinus*. Se ofrece en *c* una vista oclusal del fragmento posterior del dentario izquierdo de *Obdurodon dicksoni*; y en *d* lo mismo de *Ornithorhynchus anatinus*.



6. MOLAR SUPERIOR DERECHO del primer ornitorrico americano, *Monotrematum sudamericanum*.

lo menos hasta el Paleoceno tardío. La existencia entre esos mamíferos de grupos de ungulados sudamericanos de gran tamaño indica que, de existir barreras marinas, no lo fueron hasta el punto de impedir la distribución entre Patagonia y la Antártida occidental de muchos mamíferos terrestres.

La presencia de un monotrema en el Cretácico temprano de Australia, que por entonces era la terminación oriental del supercontinente Gondwana, y el hallazgo ahora de este nuevo ornitorrínquido en el Paleoceno del extremo austral sudamericano sugieren que vivieron en América del Sur durante el Cretácico. Ahora bien, la fauna de mamíferos del Cretácico tardío de Patagonia no contiene ningún resto de monotrema. Tampoco lo hay en capas paleocenas de Bolivia, contemporáneas de las capas de Patagonia que aportaron el resto de *Monotrematum sudamericanum*. Si aceptamos que esas ausencias son la expresión de la realidad biogeográfica y evolutiva, la más económica explicación es que la historia de los monotremas sucedió en Australia, que fue la parte más oriental de Gondwana, y que su presencia en el Paleoceno patagónico es producto de una migración, o expansión de la distribución original, y que sucedió en el lapso Cretácico más tardío-Paleoceno más temprano.

Durante el tránsito del Cretácico tardío al Paleoceno, la provincia weddelliana fue un archipiélago formado por la acción volcánica del activo rift que producía las derivas de los continentes sudamericano y antártico. Esa acción geodinámica combinada con las variaciones del nivel marino debieron de variar selectivamente el efecto de filtro entre ambos continentes. Más aún, extensos brazos marinos fragmentaron por entonces el extremo austral del continente sudamericano, que fraccionaron el actual territorio patagónico en varios territorios.

Ese devenir geodinámico y eustático explica las divisiones de los ambientes que dan respuestas afirmativas a las hipótesis de por qué la biota del sur de América del Sur difiere de la del norte y guarda una relación más estrecha con la fauna de los continentes australes que con la de América del Norte; y explica, asimismo, por qué la biota actual de esta porción austral del continente parece corresponderse con un área que es compuesta en sí misma.

Las razones de la aparente ausencia de monotremas durante el Paleoceno en territorios extrapatagónicos, así como la desaparición de ellos en el continente sudamericano y su persistencia actual en Australia, encuentran explicación en los sucesos geodinámicos y eustáticos del lapso Cretácico tardío-Paleoceno temprano. Aquel prolongado brazo marino que casi seccionó el territorio sudamericano debió de ser una barrera infranqueable para los ornitorrincos, adaptados a las aguas dulces. Esta gran barrera marina sumada a las que fragmentaron la misma Patagonia debieron, en combinación, de multiplicar el efecto de barrera para la dispersión de ciertos tipos de vida, estableciendo el aislamiento que dio a la biota del extremo austral sudamericano sus características.

La escisión y deriva hacia el Norte de los fragmentos sudamericano y australiano del supercontinente Gondwana tuvieron decursos diferentes: mientras América del Sur sufrió prolongados intervalos de aislamiento hasta que se tendió el puente centroamericano, Australia estuvo continuamente aislada, y en su mayor parte dentro de regiones templadas y subtropicales. Patagonia mantuvo una posición austral constante y se vio más intensamente afectada por el enfriamiento que caracterizó la definición del continente Antártico; en cambio, la mayor parte de Australia no sólo ingresó en latitudes de climas cálidos, subtropicales, sino que estuvo más atemperada por la influencia de los mares que continuamente la rodearon. La extinción de los ornitorrincos de América del Sur y su persistencia en Australia encuentran razón en esta disímil historia geográfica.

El grado de identidad taxonómica de los restos de organismos hallados en estratos coetáneos de distantes continentes fue el fundamento de la teoría de la deriva continental. Pero la mayoría de esos documentos biológicos lo fueron de taxa de los tiempos intermedios del Fanerozoico y con muy lejana relación, o ninguna, con grupos vivientes. Son pocos los ejemplos que permitan rastrear en el pasado los antecedentes evolutivos de taxones vivientes. Sin embargo, en muchos casos la información que proveen los restos fósiles va mucho más allá de la exclusiva paleogeográfica. El hallazgo del ornitorrinco fósil de Patagonia ha reforzado el conocimiento de pautas y ritmos evolutivos del único grupo de mamíferos primitivos que tiene representantes vivientes, insinuando aún más promisorias perspectivas del conocimiento de las primeras etapas de la historia evolutiva de los mamíferos.



7. LOS RESTOS DE ORGANISMOS marinos y terrestres de fines de la era Mesozoica y de comienzos de la era Cenozoica indican que alguna suerte de conexión existió entonces entre Patagonia y Gondwana Oriental. Ellos han permitido reconocer la existencia entonces de la Provincia Biogeográfica Weddelliana (*zona sombreada*). La flecha señala el lugar de Patagonia (Golfo de San Jorge) donde fue hallado el ornitorrinco fósil sudamericano (*Monotrematum sudamericanum*).

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE FIRST NON-AUSTRALIAN MONOTREME: AN EARLY PALEOCENE SOUTH AMERICAN PLATYPUS (MONOTREMATA, ORNITHORHYNCHIDAE). R. Pascual, M. Archer, E. Ortiz Jaureguizar, J. L. Prado, H. Godthelp y S. J. Hand, en *Platypus and echidnas* (M. L. Augee, ed.), págs. 1-14. The Royal Zoological Society of New South Wales, Sydney.

RECONSTRUCTION OF THE CRANIAL VESSELS IN THE EARLY CRETACEOUS MAMMAL *VINCELESTES NEUQUENIANUS*: IMPLICATIONS FOR THE EVOLUTION OF THE MAMMALIAN CRANIAL VASCULAR SYSTEM. G. W. Rougier, J. R. Wible y J. A. Hopson, en *J. Vert. Paleont.*, vol. 12, n.º 2, págs. 188-216. 1992.

DEFINITION, DIAGNOSIS AND ORIGIN OF MAMMALIA. T. Rowe, en *J. Vert. Paleont.*, vol. 8, n.º 3, págs. 241-264. 1988.

Quarks por ordenador

Cómputos de años de duración han contribuido a confirmar la teoría fundamental de los quarks y han permitido la identificación de una nueva partícula

Donald H. Weingarten

Mantener en funcionamiento ininterrumpido un superordenador durante varios años y con el propósito de generar alrededor de una docena de resultados podría provocar más de un gesto de impaciencia. Pero en mi opinión, y en la de mis colaboradores, ha sido tiempo bien empleado. Las tareas que habíamos asignado a la máquina eran tan complicadas, que resultaba de todo punto imposible realizarlas con lápiz y papel. Por otra parte, concernían a cuestiones fundamentales de la teoría de partículas elementales. Parecía, pues, razonable invertir algunos años en el cálculo.

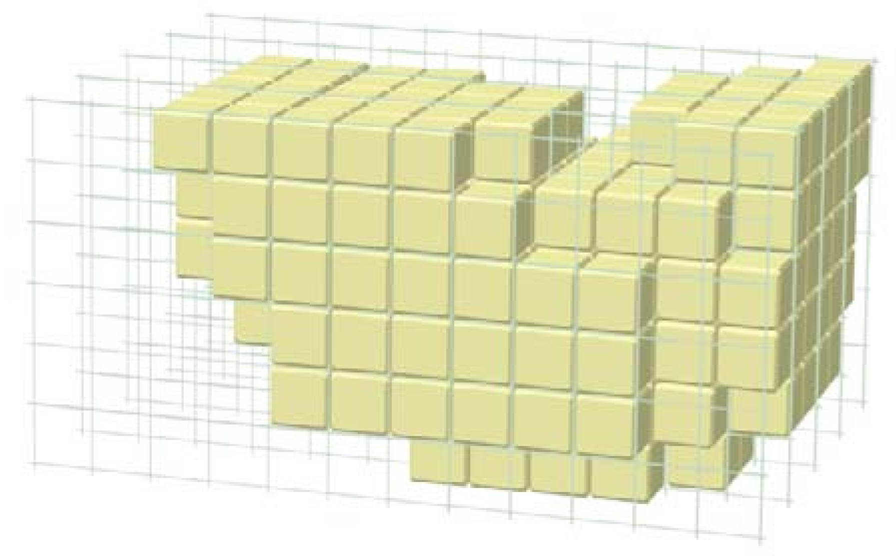
Los problemas que nos interesaban nacen de la cromodinámica cuántica, teoría que gobierna el comportamiento de los quarks. La CDC, como es frecuente abreviarla, se formuló en los años setenta; describe el modo en que los quarks se combinan de dos en dos o de tres en tres para formar hadrones, clase de partículas sujetas a la interacción nuclear fuerte. Pertenecen a esta familia el protón y el neutrón, amén de otras clases más exóticas de partículas de efímera aparición en ciertas colisiones de alta energía que se producen en los aceleradores de partículas o en las lluvias de rayos cósmicos. Los primeros datos indicativos de que la teoría CDC tenía grandes visos de ser correcta se obtuvieron en experimentos de dispersión de electrones por hadrones, concebidos con el propósito de calar en la estructura interna del hadrón. La teoría constituye hoy una de las piezas clave del modelo estándar de la física de partículas.

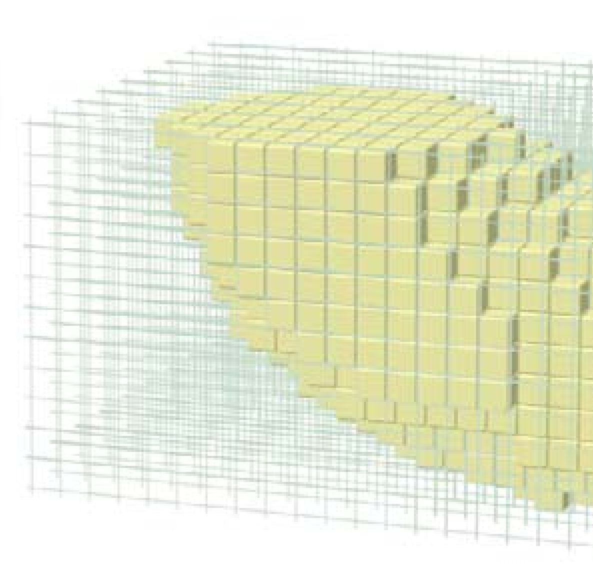
Faltaba, empero, un elemento probatorio de importancia. Por constituir la teoría fundamental sobre los quarks, la CDC debería permitir el cálculo de la masa del protón o del neutrón y, a decir verdad, de cualquier hadrón. (La masa de muchos hadrones se había medido ya experimentalmente; las del protón y del neutrón, sin ir más lejos, se descubrieron en el primer tercio de nuestro siglo.) Pero la resolución de los cálculos matemáticos necesarios para la deducción de tales masas a partir de la teoría excedía de lo posible con métodos manuales: hasta el más potente de los ordenadores de hace veinte años hubiera tenido que operar sin pausa durante más de un siglo.

Por esta razón, el autor y sus colegas del Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM, comenzaron en 1983 a diseñar una computadora de procesamiento en paralelo para dedicarla en exclusiva a cálculos de CDC. La máquina podría ejecutar unos 11.000 millones de operaciones aritméticas por segundo, con lo que sería varios cientos de veces más potente que las máquinas más veloces de la época. (Los progresos en ordenadores han hecho que tal velocidad resulte hoy menos impresionante: equivale a hacer funcionar unos 200 ordenadores de escritorio que utilizasen los microprocesadores Pentium más avanzados.)

En 1991, al cabo de ocho años de diseño, financiación y construcción, pudimos iniciar nuestras evaluaciones de CDC. Transcurrido un año de

1. CUBICACION del espacio y del tiempo para operar en cromodinámica cuántica reticular. Para representar aproximadamente la realidad, los cálculos se realizan sobre retículos progresivamente mayores y más densos, con lo que mejora la exactitud global de la representación; en este caso, de una rosca de pan.





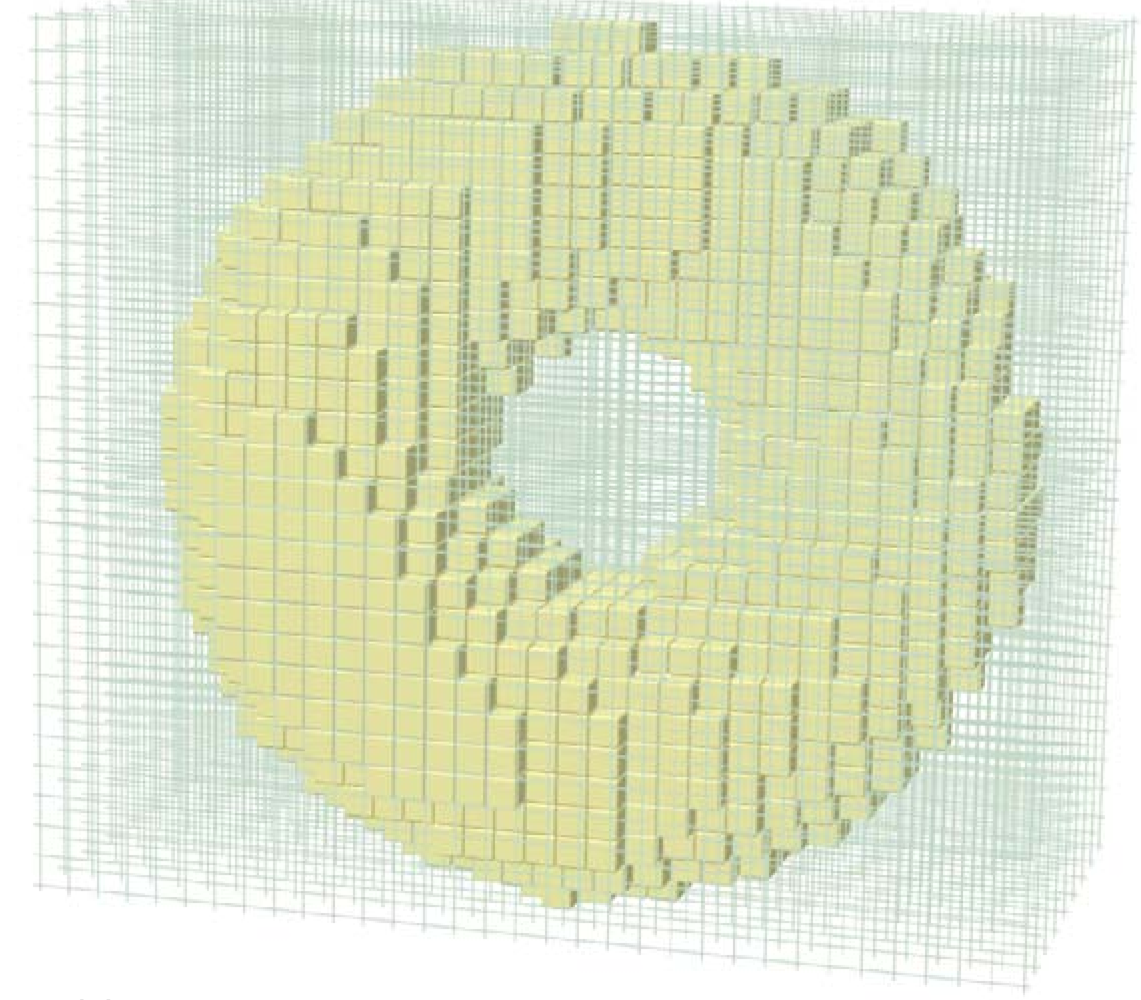
ininterrumpida molienda de números, el ordenador, bautizado GF11, produjo los primeros resultados, entre los que figuraban las masas del protón y de otros siete hadrones. Las discrepancias entre nuestras predicciones y los resultados experimentales eran inferiores al 6 por ciento, siendo más atribuibles al algoritmo estadístico utilizado que reflejo de incertidumbres en la CDC propiamente dicha.

En noviembre de 1995 concluimos otro conjunto de cálculos. Esta vez, tras dos años de operación incesante del ordenador. La máquina halló la masa y el período de desintegración de una escurridiza partícula subnuclear perteneciente a una subfamilia de hadrones llamados “glubolas” (*glueballs*, en la jerga). Valiéndonos de estos datos y revisando concienzudamente una tabulación de resultados experimentales, el autor y sus colegas descubrieron que dicha glubola había aparecido en experimentos de laboratorio ya efectuados, aunque había pasado inadvertida. Este cálculo CDC constituye, pues, el primer caso en que la computación a gran escala desemboca en la identificación de una nueva partícula.

Por ello, estamos convencidos de que nuestro trabajo sobre las masas de los hadrones y sobre las masas y el período de desintegración de las glubolas proporciona una importante confirmación de la CDC. Nuestro trabajo puede también ofrecer un ejemplo del tratamiento que recibirán en el futuro los problemas de física fundamental. Puesto que el costo de los aceleradores de partículas y la complejidad de la teoría conspiran para limitar nuestra exploración de la naturaleza, la computación a gran escala puede resolver problemas que no es posible abordar por otras vías.

¿Cuál es la razón de que el comportamiento de los quarks sea tan complejo? En una pequeña parte, cabe atribuirla a la variedad de formas en que pueden combinarse los quarks. Se presentan éstos en seis “sabores”: arriba, abajo, extrañeza, encanto, cima y fondo. Poseen, además, uno de tres tipos de “color” o “carga cromática”, que suelen denominarse rojo, verde y azul. Son posibles, por consiguiente, 18 combinaciones distintas de características de quarks. Existen, asimismo, versiones de los quarks en antimateria, con su lote correspondiente de 18 combinaciones de antisabores y anticolores. La CDC prohíbe que los quarks o los antiquarks vagabundeen libremente, por lo que los físicos han de deducir sus características a partir de la observación de las interacciones entre pares de hadrones o entre hadrones y otras partículas elementales, como los electrones y los fotones.

Sin embargo, la fuente primaria de la complejidad de la CDC se debe a que las cargas cromáticas originan un pozo de energía, que recibe el nombre de campo cromoeléctrico. De ese modo, las cargas cromáticas de los quarks guardan cierto paralelismo con las cargas eléctricas ordinarias, que crean en torno a sí un campo electromagnético. Y de igual manera que un campo electromagnético pone los electrones, dotados de carga negativa, en conexión con el núcleo de un átomo, que tiene carga positiva, similarmente el campo cromodinámico liga entre sí quarks y antiquarks en el interior de los hadrones. (La materia y la antimateria pueden coexistir en proximidad durante breves períodos, antes de su mutua aniquilación.) La CDC da cuenta así de una gama de



CDC por el método de Monte Carlo

Para eludir el enorme esfuerzo computacional que la CDC reticular de otra forma entrañaría, los investigadores recurren a un atajo denominado "método de Monte Carlo". Dicha técnica permite hallar las "amplitudes de transición", esto es, las probabilidades de que los quarks y el campo cromoeléctrico se desplacen desde un determinado punto inicial hasta cierto estado final. Tenemos un ejemplo en el lanzamiento de un dado, en el cual la amplitud de transición es sencillamente la probabilidad de que el dado se detenga con una cara particular hacia arriba. El truco está en que el dado está cargado, y no sabemos cuáles son las caras cargadas. Además, el resultado depende de la orientación del dado antes del lanzamiento y del tiempo que se haya agitado antes de lanzarlo.

El método de Monte Carlo consiste en lanzar el dado y observar lo que ocurre, como se haría en una partida de dados real (de aquí el nombre del método). Para hallar la amplitud de transición entre, sea por caso, la posición con un punto arriba y seis puntos abajo y la posición que un minuto después mostraría seis puntos arriba y uno abajo, empezaríamos tomando el dado con un punto arriba, lo agitaríamos algún tiempo, y lo lanzaríamos, de modo que quedase en reposo un minuto después, observando entonces si hay seis puntos a la vista. El procedimiento se repite varias veces. El tanto por ciento de ensayos en los que el dado acaba mostrando seis puntos arriba proporciona la amplitud de transición deseada.

LOS LANZAMIENTOS de un dado contribuyen a la amplitud de transición solamente si el dado queda mostrando un seis **(primera y tercera filas).**

En el caso de la CDC, el proceso de la determinación de la amplitud de transición no es muy distinto. Para empezar, se especifica la configuración de campo deseada en el instante inicial (esto es, la mano sostiene el dado con cierta orientación). A continuación, el ordenador crea una secuencia cronológica aleatoria de campos que se extienden a lo largo de la dimensión temporal del retículo (agita el dado). Concluido el tiempo especificado, se detiene en un cierto campo (lanza el dado). Se examina entonces el resultado para determinar si coincide con la configuración final deseada (se mira a ver si obtuvimos el seis). El tanto por ciento de ensayos que producen la configuración final especificada nos da la amplitud de transición buscada. Hallada la probabilidad de la transición, con un poco de aritmética se logra descubrir las masas reales de los hadrones.

En un cálculo CDC típico, se le entrega a cada uno de los 566 procesadores en paralelo de GF11 un fragmento del retículo para que lo compute. Los algoritmos para la generación de campos cromoeléctricos aleatorios y para la determinación de movimientos de los quarks aparecen como programas encargados de hacer que cada procesador "marche" por su porción de retículo. En cada nodo del retículo, cada procesador se detiene para "agitar" el campo cromoeléctrico —el análogo CDC de agitar el dado— de una forma que depende del campo existente en dicho punto y en las localidades vecinas.

Tratamos con el GF11 de determinar hasta qué punto coincidirían los valores calculados por nosotros con las

posibles hadrones, al combinarse y acoplarse entre sí de diversas formas los 36 distintos tipos de quarks y antiquarks.

Pero el paralelismo entre un campo electromagnético ordinario y un campo cromoeléctrico no se puede llevar más lejos. A diferencia del campo electromagnético, el campo cromoeléctrico puede interactuar intensamente consigo mismo y crear diversas clases de condensados. En el seno de un hadrón, el campo se condensa en configuraciones intensas y delgadas, a modo de cuerdas. Estas cuerdas portan en sí una fracción importante de la masa total de los hadrones, y son la causa principal de que no podamos deducir la masa del hadrón por simple adición de las masas de los quarks que contiene. Tan vigorosa interacción del campo cromoeléctrico consigo mismo constituye, en última instancia, la principal dificultad para la evaluación de masas hadrónicas a partir de la cromodinámica cuántica.

Las piezas filiformes del campo cromoeléctrico pueden desarrollar también bucles cerrados, creando así —según la teoría CDC— una partícula sin quarks ni antiquarks. Dado que el campo cromoeléctrico es el "pegamento" (*glue*, en inglés) que mantiene de una pieza los hadrones compuestos por quarks, las partículas compuestas exclusivamente por el campo reciben el nombre de glubolas.

La obtención de predicciones a partir de estas ideas generales sobre la CDC requiere una interpretación matemática más específica del comportamiento de los quarks y del campo cromoeléctrico. Los métodos numéricos (algoritmos de computación) que se han aplicado a cálculos de cromodinámica cuántica se basan todos en cierta formulación de la teoría propuesta en 1974 por Kenneth G. Wilson, actualmente en el claustro de la Universidad estatal de Ohio.

El enfoque de Wilson es de corte técnico. A grandes rasgos, su versión de la CDC describe la variación, en el tiempo, de la configuración de los quarks y el campo cromoeléctrico del mundo. Por ejemplo, a mediodía, una posible configuración pudiera consistir en un quark que va a colisionar con otro quark a la velocidad de un kilómetro por hora, siendo igual a cero el campo cromoeléctrico en todos los puntos del espacio. Otra situación, observada posiblemente a las 2 de la tarde, mostraría a los quarks desplazándose en direcciones opuestas que forman 90 grados con su trayectoria original, siendo no nulo el campo cromoeléctrico en ciertos puntos del espacio. Wilson, en su versión de la CDC, le asigna a este cambio una probabilidad en el período que va desde las 12 a las 2 de la tarde. La deducción de predicciones cuantitativas a partir de la CDC requiere el análisis, con algo de artificio

masas observadas en el mundo real, esto es, cuando la separación entre los puntos reticulares es nula y el volumen del retículo, infinito. Calculamos las masas correspondientes a distintos volúmenes y mallas reticulares.

En primer lugar, tomamos el límite de volúmenes grandes. Para la separación de los nodos reticulares adoptamos la distancia $1,5 \times 10^{-14}$ cm, que, según sabíamos, daba resultados no demasiado alejados de los valores másicos correspondientes al hacer tender a cero el lado de la malla. Procedimos a calcular, con este valor del espaciamiento, las masas correspondientes a retículos de distintos tamaños espaciales. Los resultados generados con un retículo de 16 unidades de lado se encontraban dentro del 5 por ciento del valor límite correspondiente al volumen infinito; con retículos de 24 unidades, los resultados estaban dentro del 1 por ciento.

En el segundo paso afrontamos el límite de la separación entre los puntos del retículo. Calculamos las masas de un retículo de 24 unidades con una separación entre puntos de $1,0 \times 10^{-14}$ centímetros y sobre un retículo de 32 unidades de lado con separación de $0,75 \times 10^{-14}$ centímetros. Ambos retículos tienen el mismo volumen que nuestro retículo original de 16 unidades. Estos cálculos nos permitieron extrapolar nuestras predicciones al caso de espaciamiento reticular igual a cero; o con otras palabras, la comparación de los números con los valores másicos observados.

—D. H. W.

matemático, de tales probabilidades de transición.

La formulación de Wilson se aplica a un mundo bastante insólito: se abordan el espacio, continuo e ilimitado, y el tiempo de la realidad mediante un retículo discreto de puntos, algo así como los vértices de un tablero de ajedrez tetradimensional (tres dimensiones para el espacio y una para el tiempo). Este andamiaje está restringido a un volumen finito, lo que tiene por resultado que la totalidad del espacio y el tiempo se representen de forma aproximada por un conjunto finito de puntos. En cada punto tiene lugar una configuración específica de quarks y de campo cromoeléctrico. De ahí que la teoría, en la forma de Wilson, se conozca por CDC reticular.

Es de esperar que los resultados correspondientes al mundo real se obtengan efectuando cálculos sobre una secuencia de retículos cuya separación entre vértices va disminuyendo progresivamente y cuyo volumen va creciendo, también progresivamente: dicho de otro modo, haciendo que la distancia entre vértices del retículo se contraiga a cero, a la vez que el volumen de la red se expande hacia infinito. El límite de esta sucesión de resultados constituye la predicción CDC reticular para el mundo real.

El problema computacional estriba en que la regla de Wilson para la determinación de la probabilidad de una transición requiere la sumación de una enorme colección de términos. En tal adición aparece un sumando para cada una de las posibles formas de construir una especie de tabla de dos columnas. En esa tabla, una de las columnas enumera todos los puntos del retículo y, en la otra, la configuración de quarks y campos correspondientes al punto.

En una tabla así, el número de distintas formas de insertar la información sobre configuración es, en verdad, astronómico. El campo cromoeléctrico en cada punto del retículo está representado por un conjunto de 32 números reales. En un retículo de 10 puestos en cada dimensión (10 por 10 por 10 por 10, que viene a ser el tamaño mínimo capaz de proporcionar una burda aproximación de la realidad), una tabla descriptiva del campo en cada uno de los puntos ha de especificar 320.000 números reales, o sea, 32 números para cada uno de los 10.000 puntos reticulares. Aun despreciando la complicación adicional que supone irle siguiendo la pista a los quarks e introduciendo la simplificación, poco realista, de que cada uno de 320.000 números sólo pueda ser cero o uno, cada tabla constituye una secuencia de 320.000 ceros o unos. La lista completa de tales secuencias —y, por tanto, el número total de posibles términos en la suma de Wilson— consta de 2 elevado a 320.000 elementos, lo que viene a ser un 1 seguido por 96.000 ceros.

En 1979, Michael J. Creutz, Laurence A. Jacobs y Claudio Rebbi, todos del Laboratorio Nacional de Brookhaven, introdujeron un método numérico práctico para eludir tan enormes cómputos, valiéndose en parte de una sugerencia de Wilson. Su método constituye una variante de la integración de Montecarlo, que proporciona soluciones aproximadas de problemas complejos por métodos de muestreo estadístico, de forma muy similar a la realización de un sondeo para determinar el vencedor de unas elecciones.

DONALD H. WEINGARTEN se halla adscrito al Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM, en Yorktown Heights. Se doctoró en la Universidad de Columbia y es miembro de la Sociedad Americana de Física. Además de sus estudios de cromodinámica cuántica numérica, explora las teorías cuánticas de la gravedad y diversas clases de arquitectura de los ordenadores.

En lugar de sumar explícitamente la vasta colección de posibles configuraciones reticulares, se utiliza un proceso de muestreo para estimar la suma, examinando un conjunto mucho menor de términos típicos, seleccionados al azar. La evaluación por este método de un retículo de 10 unidades solamente requiere unos 20.000 millones de operaciones aritméticas. En 1979, un ordenador razonablemente rápido era capaz de efectuar alrededor de medio millón de operaciones aritméticas por segundo. El método de Montecarlo podría generar una aproximación de precisión suficiente en menos de un día.

Pero la computación parecía razonable porque se aplicaba a una forma simplificada de CDC: prescindía de los quarks, y solamente tomaba en cuenta el campo cromoeléctrico. La ejecución de un cálculo parecido que considerara la teoría completa ocasionaba una serie de problemas técnicos. En 1981, diversos grupos de investigadores sugirieron variantes del algoritmo de Montecarlo capaces de incluir la presencia de quarks. Entre aquellos físicos se contaban Donald E. Petcher y el autor, quienes, en aquel entonces, trabajaban juntos en la Universidad de Indiana, así como Federico Fucito, Enzo Marinari y Giorgio Parisi, de la Universidad de Roma, que lo hacían en colaboración con Rebbi. En los algoritmos reformados se incluía una medida de la dificultad que tendrían los quarks y antiquarks para viajar desde la configuración inicial hasta la final.

El costo de la inclusión de los quarks y antiquarks en los algoritmos reformados fue el de un gran incremento en el número de operaciones aritméticas necesarias para efectuar cálculos significativos. Ni siquiera los ordenadores más rápidos de la época podrían haber “mascado” los números de retículos de tamaño suficiente para obtener, en tiempos razonables, predicciones correspondientes al mundo real. Nadie podía permitirse esperar los cien años largos que hubieran hecho falta.

El origen de este obstáculo residía en una contribución adicional a la energía de cada configuración de quarks y de campo cromoeléctrico. Esta energía extra procede de la fugaz aparición y aniquilación de pares quark-antiquark, que tiene lugar en cualquier región del espacio portadora de un campo cromoeléctrico.

El autor propuso en 1981 una técnica de compensación de tal efecto. Llamada aproximación por valencia, consiste en suprimir la contribución de los pares quark-antiquark, y en dividir al mismo tiempo todas las cargas de color por una constante "cromodieléctrica".

Acabamos descubriendo que, para evaluar el límite de las predicciones de masa correspondientes a separación reticular nula y volumen infinito, en la aproximación por valencia nos era necesario trabajar con retículos cuyo lado fuese de hasta 32 unidades. El costo total de un cómputo completo pasa a ser de unas 10^{17} operaciones aritméticas.

Los ordenadores más veloces de comienzos de los años ochenta podían realizar unos 40 millones de operaciones aritméticas por segundo, o sea, unas 10^{15} operaciones al año. Por tanto, incluso con el método de aproximación por valencia, el cálculo de las masas hadrónicas podría requerir un siglo. Así pues, una insuficiente capacidad de cómputo impedía a los investigadores extraer plenamente de la CDC reticular predicciones correspondientes al mundo real.

Monty Denneau, John Beetem y el autor, colegas en IBM, empezaron en 1983 a diseñar un ordenador concebido expresamente para realizar cómputos de CDC. Tal ordenador habría de poder realizar 11.000 millones de operaciones aritméticas por segundo; más concretamente, 11.000 millones de operaciones con números reales, o en la jerga informática, 11 gigaflops (de donde le viene el nombre de GF11 al ordenador). Dicha máquina iba a ser 250 veces más veloz que los mejores ordenadores de la época. Para alcanzar tal velocidad, nos hacía falta incorporar 566 procesadores que operasen en paralelo. El ciclo de máquina —el tiempo requerido por la máquina para efectuar una adición o una multiplicación— era de 50 nanosegundos. Cada procesador, capaz de 20 megaflops, es capaz de suministrar un dato a otros procesadores cada 200 nanosegundos. (En la actualidad hay en el mundo varias docenas de superordenadores más veloces que el GF11; el más rápido es capaz de computar a velocidad quizás unas 10 veces mayor que la sostenida por el GF11.)

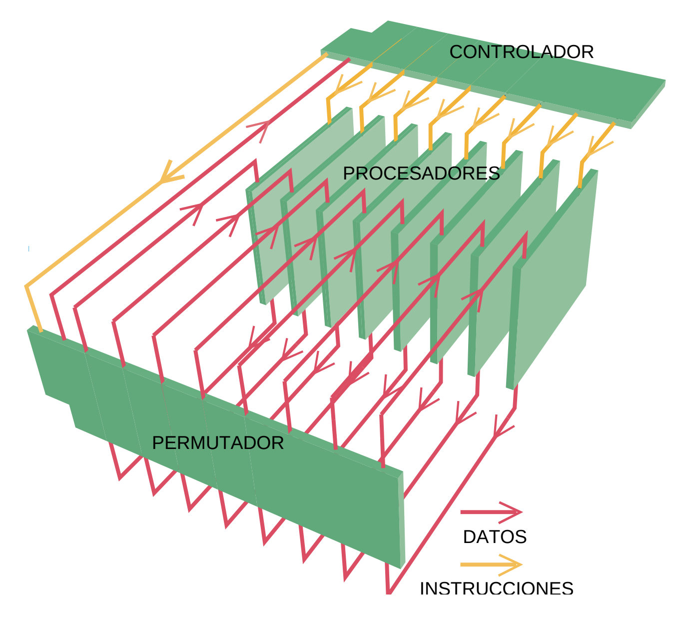
El sistema operativo del ordenador, un compilador y un conjunto de programas de diagnóstico del equipo (hardware) fueron preparados y escritos por James C. Sexton y el autor. Entre los dos pusimos la máquina en funcionamiento, trabajando en colaboración con un grupo dirigido por David George, del que formaban parte Michael Cassera, Molly Connors, Manoj Kumar, Edward Nowicki y Michael Tsao. Entre Sexton, Chi-Chai Huang, Lan Wong y el autor remataron la puesta en servicio definitiva de la máquina.

A finales de 1991, mis colegas Frank Butler, Hong Chen, Alessandro Vaccarino, Sexton y yo pudimos comenzar a calcular masas hadrónicas. Buscamos las masas de 11 hadrones formados solamente por combinaciones de los tres sabores más ligeros de quarks y antiquarks: arriba, abajo y extrañeza. Los quarks arriba y abajo son los constituyentes de los neutrones (uno arriba, dos abajo) y de los protones (dos arriba, uno abajo). Los quarks extrañeza se presentan en una variedad de hadrones inestables. Calculamos la masa de cada hadrón en retículos de diversos tamaños. Calibramos ciertos parámetros para cada elección de volumen reticular y de separación entre puntos, confrontándolos con las masas conocidas de tres hadrones. Para cada tipo de retículo nos quedaron ocho predicciones másicas. Al objeto de determinar los valores límite correspondientes a un retículo de volumen infinito y separación nula entre puntos, lo que hicimos fue extrapolar a partir de las predicciones conseguidas al reducir el tamaño de la malla reticular y aumentar el volumen. Estos resultados extrapolados señalan las predicciones de la CDC para el mundo real.

La discrepancia entre cada predicción másica y el valor correspondiente determinado en los experimentos no excedió del 6 por ciento en ningún caso. Tomadas conjuntamente, estas incertidumbres eran de tamaño compatible con los errores esperables del método de Monte Carlo utilizado por nosotros. Aunque estas soluciones se hallaron en la aproximación por valencia, estamos convencidos de que es inverosímil que la aproximación por valencia pudiera proporcionar al azar ocho resultados correctos si la CDC fuera falsa. Así pues, dichos resultados



2. EL SUPERORDENADOR GF11 consta de 566 procesadores en paralelo. El "permutador" recoge y transmite datos a los procesadores, y el controlador organiza toda la actividad. En la fotografía, los procesadores son los paneles de color bronce que se insertan en los armarios de la derecha; los cables corresponden al sistema permutador-controlador.



confirman tanto las predicciones másicas de la CDC como la fiabilidad de la aproximación por valencia.

Más recientemente, Sexton, Vaccarino y el autor han explorado la glubola más liviana (el bucle cerrado del campo cromoeléctrico mencionado arriba). Cálculos anteriores, efectuados con ordenadores más lentos, contenían incertidumbres significativas, con el resultado de que, cuando comenzamos nuestro trabajo, no se había identificado inequívocamente en los experimentos ninguna glubola. Tras dos años de funcionamiento ininterrumpido de 448 de los procesadores del GF11, logramos calcular la masa de la glubola más ligera y su tasa de desintegración en otras partículas más estables. Quedamos sorprendidos por la respuesta: según nuestros números, esta partícula había aparecido en varios experimentos distintos a lo largo de los doce últimos años. Nadie la reconoció, porque no se disponía de un perfil suficientemente detallado de sus propiedades. El cálculo constituye el primer "descubrimiento" de una partícula subnuclear mediante ordenador.

	MASA (MILLONES DE ELECTRONVOLTS)	
HADRON	CALCULADA	OBSERVADA
KAON (EN ESTADO EXCITADO)	898 12	896
PROTON	936 80	941
PHI	1026 25	1022
DELTA	1205 94	1235
SIGMA (EN ESTADO EXCITADO)	1391 62	1388
XI + SIGMA Đ PROTON	1484 57	1576
XI (EN ESTADO EXCITADO)	1582 50	1537
OMEGA	1768 69	1676
GLUBOLA MAS LIGERA	1740 70	1710

3. COMPARACION de las masas hadrónicas calculadas con los valores observados. La combinación de las masas xi-sigma-protón facilitó el cálculo.

A pesar de nuestro éxito, todavía está por conseguir una confirmación directa de la CDC sin aproximaciones. La obtención de tales resultados habrá de esperar, ora a ordenadores cientos de veces más rápidos que el GF11, ora a algoritmos cientos de veces más eficientes que los mejores de nuestros días. En la Universidad de Columbia se está preparando una máquina de esta categoría; otra, por un grupo de la Universidad de Roma, y una tercera, por la colaboración de varias instituciones japonesas. Una tarea más compleja que el cálculo de la masa, que tal vez requiera algoritmos enteramente nuevos, consistiría en utilizar la CDC para explicar los resultados de ciertas clases de experimentos de dispersión de partículas.

Además de hallar las masas de hadrones y glubolas, nuestros cómputos constituyen el anuncio de un cambio fundamental del rumbo en que se encaminaban determinadas áreas de la física de partículas elementales. Aun cuando los métodos numéricos por ordenador se habían aplicado a otras ramas de las ciencias físicas, eran los cálculos con lápiz y papel los que gobernaban el análisis teórico del comportamiento de las partículas. Nuestro trabajo sobre CDC se hizo necesario después de que los métodos analíticos se mostrasen incapaces de hacer mella en los aspectos matemáticos de la teoría; los cálculos sólo resultaron posibles después de que los ordenadores llegasen a adquirir suficiente potencia para ejecutar los algoritmos esenciales.

En el grado de certidumbre que cabe asignar a los resultados, aparece una diferencia cualitativa entre los métodos de lápiz y papel y el numérico. En el trabajo teórico con lápiz y papel, se puede verificar, al menos en principio, que cada paso es consecuencia lógica del paso precedente, pudiéndose comprobar al final si el resultado es correcto.

En contraste, tanto en la física experimental como en la computación a gran escala, ocurre casi siempre que no es posible comprobar la veracidad de los resultados en el mismo sentido matemático. Lo que se hace, por contra, es aceptar resultados plausibles cuando fracasa un número suficiente de tentativas encaminadas a demostrar que son falsos. Podríamos aceptar el principio experimental de que todas las piedras caen al soltarlas, y no que suben, porque nadie ha encontrado una piedra que suba al dejarla suelta. Subsiste, empero, la posibilidad de que alguien, algún día, encontrara una piedra que subiera. Así pues, en sentido matemático estricto, la afirmación de que todas las piedras caen sigue estando sin demostrar.

En nuestro trabajo también tuvo lugar una suerte de búsqueda infructuosa de una piedra que sube. Cabe cierta posibilidad de que, si la masa del protón se hubiera calculado mediante un retículo de malla mucho menor que la utilizada, el resultado obtenido fuese, sea por caso, de 2000 millones de electronvolts (o sea, 2000 MeV, siendo 1 MeV aproximadamente igual a $1{,}78 \times 10^{-30}$ gramos), en contradicción con nuestro valor extrapolado para el retículo de malla nula, que es 936 MeV. Por consiguiente, el límite declarado para la masa del protón está verificado por la sucesión de números intervinientes en nuestra extrapolación, pero no está verdaderamente demostrado.

Los cálculos realizados por nosotros podrían quedar descritos por una frase en apariencia contradictoria: "física teórica experimental". Dada la complejidad de las teorías físicas, el costo de los enormes proyectos y el incesante aumento de capacidad computacional, la física teórica experimental pudiera ser, para ciertas regiones de la física, la forma más práctica de sondear la naturaleza.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GAUGE THEORY OF ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS. Ta-Pei Cheng y Ling-Fong Li. Oxford University Press, 1984.

LATTICE QUANTUM CHROMODYNAMICS. D. Weingarten en *Particles, Strings and Supernovae*. Selección de A. Jevicki y C.-I. Tan. World Scientific, Singapur, 1992.

LATTICE GAUGE THEORIES. H. J. Rothe. World Scientific, Singapur, 1992.

HADRON MASS PREDICTIONS OF THE VALENCE APPROXIMATION TO LATTICE QCD. F. Butler, H. Chen, J. Sexton, A. Vaccarino y D. Weingarten en *Physical Review Letters*, volumen 70, n.º 19, págs. 2849-2852; 10 de mayo de 1993.

QUARKS, GLUONS AND LATTICES. M. Creutz. Cambridge University Press, 1993.

QUANTUM FIELDS ON A LATTICE. I. Montvay y G. Munster. Cambridge University Press, 1994.

Baterías de litio

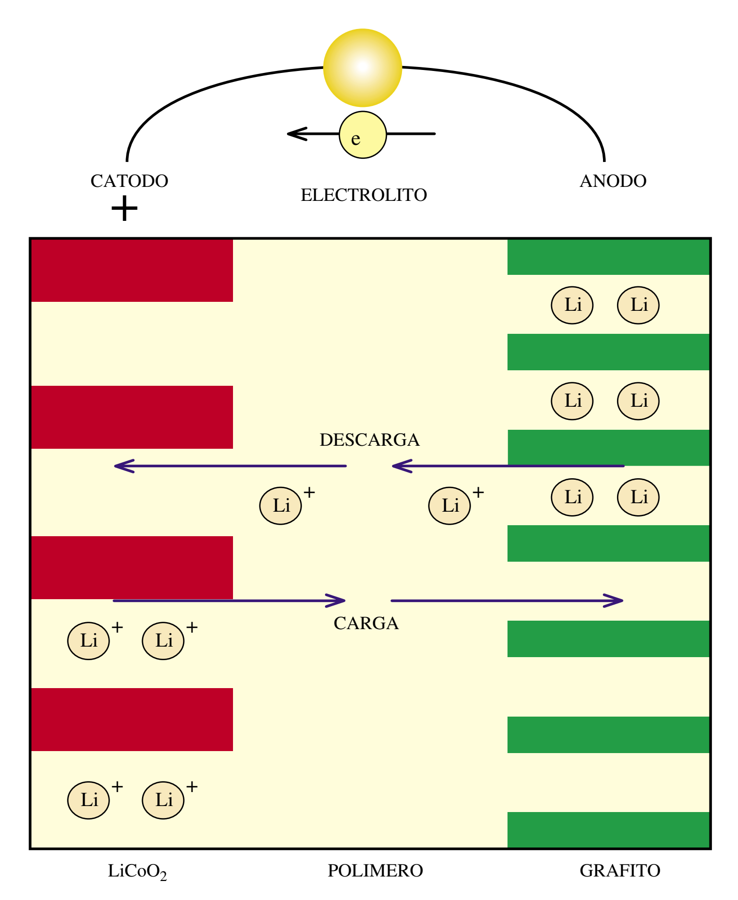
La alternativa al plomo y al cadmio

No solemos caer en la cuenta de que nuestro mundo gira, en buena medida, en torno a las baterías. Están por doquier, escondidas en las entrañas de los artículos más dispares, de los juguetes a los automóviles. Pero no todas las baterías son iguales. Algunas las usamos y las tiramos (o mejor, las reciclamos) porque no se pueden recargar; son las baterías "primarias", como las populares alcalinas, de múltiples aplicaciones, algunas tan vitales como la alimentación de marcapasos.

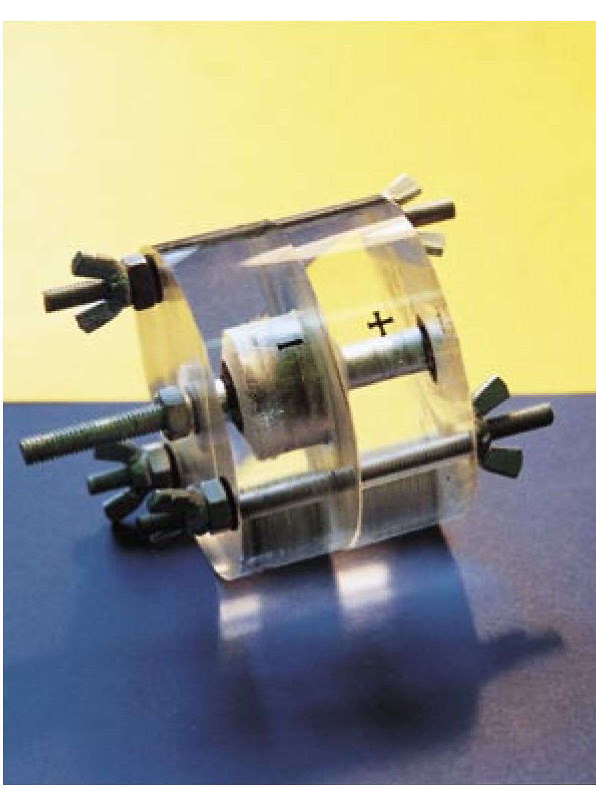
Las baterías "secundarias" o recargables ofrecen un amplio abanico de prestaciones. Dos tipos dominan hoy el mercado: las baterías de plomo y las de níquel-cadmio. Pertenecen a la primera categoría las instaladas en nuestros automóviles, destinadas a cubrir las necesidades de arranque, iluminación e ignición. (Carecen, sin embargo, de suficiente energía para mover el coche.) Las baterías de níquel-cadmio se aplican en el suministro eléctrico de artículos de electrónica de consumo, como videocámaras y ordenadores o teléfonos portátiles. Uno y otro tipo adolecen de limitaciones técnicas: las de plomo presentan una baja densidad de energía y una descarga profunda irreversible; las de Ni-Cd se descargan solas muy pronto y presentan un peculiar efecto memoria que reduce su capacidad. Además, el usuario debería saber que los elementos que componen las baterías secundarias son altamente contaminantes, sobre todo el plomo y el cadmio, y que en el caso de este último el reciclado dista de ser perfecto.

Pese a todo, la demanda del mercado de baterías recargables seguirá creciendo a corto y a medio plazo. De ahí la exigencia de una búsqueda de baterías menos contaminantes, más ligeras y de mayor densidad de energía para el mercado de la electrónica de consumo. A la demanda de éste habría que añadir, a más largo plazo, el no menos importante mercado de baterías recargables para tracción de vehículos. Las baterías constituyen, en efecto, el punto débil de los prototipos eléctricos que empezarán a salir pronto al mercado del automóvil. Sus prestaciones limitadas y alto precio relativo hacen dura la competencia con los vehículos de combustión. A su favor tienen la creciente demanda social de técnicas limpias, respetuosas con el entorno, que privilegia el desarrollo de vehículos eléctricos, sobre todo en zonas urbanas.

¿Qué tecnología (sistema) es la ideal para el desarrollo de nuevas baterías recargables? Depende de la aplicación que se le asigne. Existen ya numerosos tipos de baterías en fase de desarrollo: sodio/azufre, zinc/aire, hidruro metálico/óxido de níquel y baterías de litio, entre otras. Aunque



1. Esquema de la estructura y funcionamiento de una batería de ion litio



2. Soporte que contiene la batería de litio para su ensayo

todas tienen ventajas e inconvenientes, las baterías de litio, junto quizás a las de hidruro metálico, son las que van encontrando un mayor reconocimiento, en cuanto a sus posibilidades, y a ellas se destina mayor esfuerzo en investigación y desarrollo.

Varias razones avalan esa opción. En primer lugar, el litio es el metal más ligero, lo que da lugar a una alta capacidad específica y, por tanto, permite obtener la misma energía con un peso muy inferior. Por otro lado, cuando un ánodo de litio metálico se combina con cátodos de ciertos óxidos de metales de transición, las celdas electroquímicas reversibles resultantes presentan valores de voltaje superiores a los de otros sistemas; ello contribuye a una alta densidad de energía. Además, la tecnología del litio es de las más versátiles y puede encontrar aplicaciones comerciales en muy distintos ámbitos, desde los que requieren pequeñas y delgadas microbaterías hasta baterías de alta capacidad y reducido peso para automóviles. Finalmente, y a diferencia del plomo o cadmio, los materiales que componen las baterías de litio más prometedoras no representan ningún problema de contaminación ambiental.

En los primeros prototipos de baterías de litio, el electrodo positivo (cátodo) solía ser un óxido o sulfuro metálico con capacidad de intercalar y desintercalar iones litio en los procesos de descarga y carga de la batería. En estos primeros sistemas, el electrodo negativo (ánodo) estaba constituido por litio metálico que debía sufrir procesos reversibles de disolución durante la descarga y deposición durante la recarga.

Para llegar a su fase de aplicación, las baterías de litio han tenido que superar inconvenientes, algunos de ellos graves. El más serio obstáculo para la comercialización de baterías de litio recargables procedía de la gran reactividad del litio metálico, con el riesgo que ello conlleva. El uso del metal como ánodo se vio asociado a problemas de crecimiento dendrítico del litio durante los procesos de recarga continuados. Este comportamiento acarreó problemas de funcionamiento y seguridad.

Pero las dificultades se resolvieron con la introducción de dos variantes dentro de esta técnica: las baterías de "ion-litio" y el desarrollo de electrolitos poliméricos plásticos menos reactivos que sus análogos líquidos. En las baterías de ion litio el ánodo no está formado por litio metálico, sino por otro material mucho más seguro, como el grafito, capaz de intercalar (o almacenar) iones de litio en una forma menos reactiva que la del litio metálico, sin un notable detrimento de su densidad energética. Este gran avance no sólo representó la introducción de una técnica mucho más segura, sino que introdujo ventajas adicionales, como el excelente comportamiento de reversibilidad durante los procesos de carga y descarga que caracteriza a las actuales baterías de ion-litio.

Las baterías recargables de ion litio que empiezan ya a aparecer en el mercado están compuestas de cátodos de $LiCoO_2$, electrolitos poliméricos y ánodos de grafito altamente densificados y con poca superficie, para minimizar los fenómenos de pasivación que también les afectan. Se pueden recargar hasta 2500 veces. Gracias a su bajo precio constituyen la mejor alternativa en el mercado de la electrónica de consumo. La asignatura pendiente continúa siendo la obtención de sistemas de alta potencia, como los necesarios para automóviles eléctricos.

La investigación y el desarrollo de baterías recargables de litio se propone ahora mejorar aspectos específicos de sus características técnicas. Citemos, a modo de botón de muestra, la creación de electrodos en forma de capa delgada que permitan el montaje de sistemas de mayor potencia, la búsqueda de nuevos materiales que incrementen la capacidad y energía específicas de las celdas o la fabricación de baterías "plásticas" delgadas y flexibles aptas para su uso en aplicaciones microelectrónicas, así como el diseño de baterías de litio totalmente sólidas.

NIEVES CASAÑ y PEDRO GÓMEZ
Instituto de Ciencia de Materiales
(C.S.I.C.) Barcelona

Heterofullerenos

Aislados, por fin, en el laboratorio

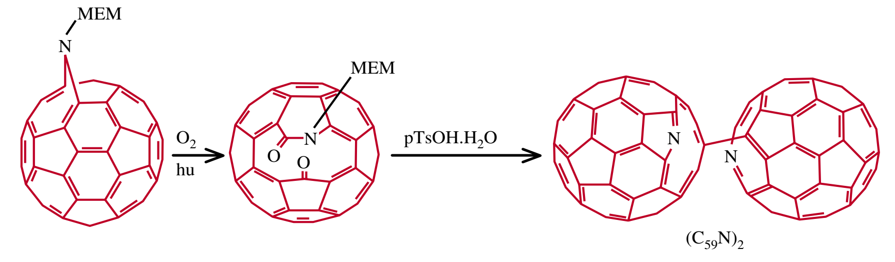
Cuando los robots jueguen al fútbol, escribía Daniel E. Koshland, en el editorial de *Science* que consagraba al C_{60} como molécula del año en 1991, tendrán una pelota perfecta, pero no se divertirán tanto como los físicos de materiales disfrutan hoy. Se trata, en efecto, de una molécula de increíble simetría, dotada de una asombrosa versatilidad química. De entonces acá, se le han buscado hermanos y primos. Entre éstos, los heterofullerenos.

Los heterofullerenos constituyen una nueva clase de fullerenos, todavía por explorar, en los que al menos un átomo de carbono de la molécula se ha sustituido por un heteroátomo (nitrógeno, boro, etcétera). La presencia de estos heteroátomos en la molécula ofrece grandes posibilidades para la modificación de las propiedades electrónicas, así como la reactividad química de estos compuestos carbonados.

Desde el descubrimiento del buckminsterfullereno C_{60} en 1985, el más abundante y estudiado de los fullerenos, y así llamado por su semejanza con las cúpulas geodésicas del arquitecto norteamericano Buckminster Fuller, esta nueva forma alotrópica del carbono ha atraído la atención de la comunidad científica. Sin embargo, fue en 1990 cuando se produjo una gran explosión en la investigación de sus propiedades físicas y químicas, al ser posible disponer en el laboratorio de cantidades macroscópicas de esta molécula. Poco después se descubrieron propiedades tan interesantes como la superconductividad de las sales de metales alcalinos, por ejemplo el K_3C_{60}, o el comportamiento ferromagnético de la sal [TDAE]C_{60}.

Se prestó especial atención a la modificación química de los fullerenos, en particular del C_{60}, lo que ha conducido a la preparación de numerosos derivados con distintos grupos funcionales unidos a la molécula. Algunos de estos productos presentan propiedades físicas y biológicas de notable interés; por botón de muestra, cierto metanofullereno soluble en agua inhibe la proteasa del virus del sida.

Sin embargo, la apertura de esta molécula esférica con el objeto de introducir diferentes átomos o moléculas en su interior, así como la preparación de heterofullerenos, han supuesto un gran reto para los químicos. Se han preparado metalofullerenos $M@C_n$ (fullerenos que contienen átomos de un metal de transición en su interior) por vaporización de grafito en presencia de estos elementos. Asimismo, se puede introducir gases nobles en el interior de estos agregados carbonados bajo condiciones de alta presión y temperatura. Una nueva aproximación para la preparación de estos compuestos endoédricos consistiría en la apertura



El dímero $(C_{59}N)_2$ constituye el primer ejemplo de un heterofullereno aislado en el laboratorio

controlada del agregado carbonado en primer lugar, la encapsulación de un determinado átomo o molécula en su interior, a continuación, y, por último, la reparación de su estructura original.

En 1995, Wudl y colaboradores, de la Universidad de California en Santa Bárbara, llevaron a cabo la apertura regioselectiva de un derivado del C_{60}, el N-MEM azafulleroide, cerrándolo de nuevo para dar lugar al heterofullereno $(C_{59}N)_2$. La fotooxigenación de este azafulleroide (derivado del C_{60} en el que el grupo nitrógeno-metoxietoximetilo está unido a la molécula) origina la ruptura selectiva de uno de los dobles enlaces directamente unidos al átomo de nitrógeno, para dar lugar a una estructura abierta. El tratamiento de la misma con ácido produce su cierre; y lo hace de suerte tal que el átomo de nitrógeno permanece incorporado en la molécula para constituir el azafullereno $C_{59}N$, el cual se aísla en forma del dímero $(C_{59}N)_2$. Aunque ya se conocía la formación en fase gas de heterofullerenos que contienen átomos de boro y nitrógeno, $C_{60\text{-}n}Bn$ y C_nN_m, conviene destacar que el $(C_{59}N)_2$ constituye el primer ejemplo de un heterofullereno aislado en el laboratorio.

La sustitución de un átomo de carbono, con cuatro electrones en la capa de valencia, por un átomo de nitrógeno, con sólo tres, hace que la molécula $C_{59}N$ posea un electrón sin aparear. Esta es la causa de su alta reactividad y de su dimerización, que origina el dímero $(C_{59}N)_2$. Asimismo, la presencia de este electrón desapareado podría dar lugar a interesantes aplicaciones prácticas, como magnetismo y conductividad eléctrica.

La obtención del heterofullereno $C_{59}N$ en el laboratorio abre las puertas al estudio de las propiedades de esta nueva familia de agregados, análogos tridimensionales de los compuestos heterocíclicos.

ROSARIO GONZÁLEZ
Universidad de California
Santa Bárbara

La ley y la trampa

Contrabando de halocarburos

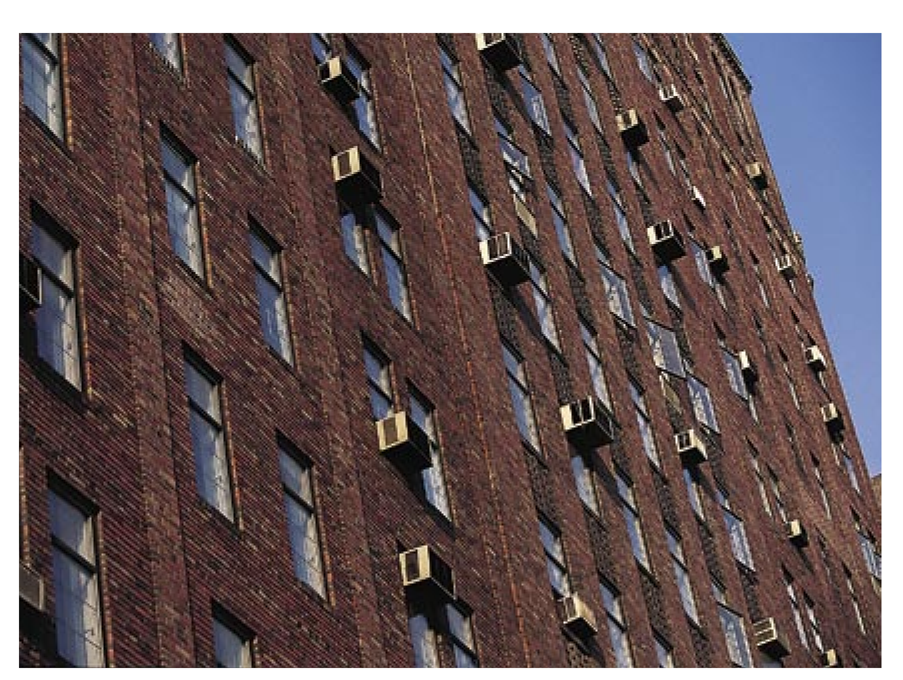
Los tratados internacionales sobre contaminación ambiental suelen carecer de objetivos claros, a duras penas se ratifican y casi nunca se cumplen. Podría ser una excepción el Protocolo de Montreal, un acuerdo establecido en 1987 y ratificado por 149 países. Se propuso allí la reducción, hasta su completa anulación, de la producción de halocarburos (CFC), causantes de la destrucción de la capa de ozono estratosférico.

Ese empeño voluntarista puede verse amenazado con el florecimiento reciente de un pingüe mercado negro de halocarburos. La voz de alarma se ha dado ya en los Estados Unidos. Aunque los funcionarios aseguran controlar la situación, admiten que no conocen la cuantía de las importaciones ilegales. La administración estima que, en Miami, el dinero que mueve esa nueva forma de contrabando sólo lo supera el narcotráfico. No es una cuestión exclusiva de allende el océano. En Europa el contrabando de CFC planteará un problema todavía mayor.

Los halocarburos se emplean como refrigerantes en coches, neveras, refrigeradores comerciales, mostradores refrigerados de alimentos y sistemas de acondicionamiento de aire para grandes edificios. Para cumplir el protocolo de Montreal, algunos países han acompasado la reducción de la producción de CFC con la subida del precio de los mismos. La espectacular disminución de la oferta y el considerable incremento de los impuestos tienen por finalidad fomentar la sustitución o reconversión de los equipos de refrigeración de manera que funcionen con sucedáneos menos perjudiciales. Pero se trata de un proceso lento, que favorece el desarrollo del contrabando.

“No sabemos realmente cuánto está entrando”, admite David Lee, de la división de protección estratosférica de la Agencia de Protección Ambiental (EPA). DuPont y AlliedSignal, las dos principales compañías productoras de halocarburos, se quejan de que ni siquiera pueden deshacerse de sus reservas, aun cuando sería de esperar una fuerte demanda. El mercado lo está ocupando ese tráfico ilegal.

Cierto es que el contrabando encuentra algunas dificultades. Ninguna empresa seria se arriesgará a una inspección fiscal que pueda descubrir



La transición de los CFC, destructores del ozono, a los HCFC, que contienen hidrógeno y se emplean en millones de aparatos domésticos de acondicionamiento de aire, se ve amenazada por el mercado negro de halocarburos

el origen de la mercancía. Ni los responsables del mantemiento de los equipos de refrigeración de grandes edificios se expondrán a estropear sus costosas instalaciones con refrigerante procedente de fuente desconocida. Más difícil resulta atajarlo en el sector automovilístico. Los talleres mecánicos no se preocupan por la pureza de los acondicionadores de aire. Los CFC baratos e ilegales pueden ser una tentación demasiado fuerte para que algunos técnicos la resistan.

La administración pública cuenta a su favor con un as contra los clientes potenciales de halocarburos de contrabando: las empresas legales. En un mundo en que la fiera se come a la fiera, si alguien cree que su competidor está obteniendo mecancía a bajo coste sin pagar impuestos, no tardará en denunciarlo.

Europa puede pasarlo mal. Según parece, buena parte de los halocarburos clandestinos se produce en países del antiguo bloque soviético. El paso de contrabando es siempre más fácil por tierra que por mar. Y pese a que la Unión Europea adoptó la prohibición de los CFC un año antes que los EE.UU., éstos han progresado más en cambiar a alternativas de los CFC. Los políticos de la Comunidad pueden llevarse un susto cuando descubran el alcance real del mercado negro.

Si no queremos que el Protocolo de Montreal se quede en papel mojado, la Unión Europa tendrá que ponerse firme ante un tráfico ilegal en auge.

W. Wayt Gibbs

El efecto Gulliver

En economía

Decía John Donne que ningún hombre es una isla, cabal por sí solo. No le faltaba razón. Su aforismo vale también para los países, mal que les pese a algunos, norteamericanos incluidos. Creen éstos que los EE.UU. son, a la manera de ciertos experimentos de física clásica, inmunes a las influencias externas. Pero la verdad es que la economía constituye un sistema abierto. Siempre lo fue. Y lo mismo que ocurrió en física con el tránsito de los modelos cerrados a los modelos abiertos, también habrán de darse profundos cambios en esa ciencia movediza.

Arthur R. Burns, que presidió la Comisión de la Reserva Federal de 1970 a 1978, representaba la estampa arquetípica de los viejos aislacionistas en economía. Disertaba y actuaba como si los EE.UU. tuvieran libres las manos para establecer su política monetaria en Washington, prescindiendo del resto del mundo. Hubo más. Durante mucho tiempo se consideró una afrenta nacional sostener la idea de que los EE.UU. formaban parte del planeta Tierra.

En 1973, Burns y George Schulz, que era entonces Secretario del Tesoro, celebraron una conferencia de prensa en París a raíz de una de las muchas crisis que acompañaron al colapso del sistema de Bretton Woods de tipos de cambio fijos, en vigor desde el final de la segunda guerra mundial. Un periodista preguntó a Schulz qué supondría la flotación del dólar para la política monetaria norteamericana. Según cuenta Paul Volcker la historia de lo sucedido, Burns, que nunca abdicaba de las prerrogativas de un presidente independiente de la Reserva Federal, se adelantó para cogerle a Shultz el micrófono y pronunciar en su tono más autoritario: “La política monetaria norteamericana no se hace en París; se hace en Washington”.

Pero quienes viven en países pequeños, con estrechas relaciones con vecinos mayores, saben desde hace mucho tiempo que su economía sube y baja con las mareas globales. A comienzos de siglo, un grupo de economistas e historiadores suecos anunciaron que habían hallado correlaciones entre los precios internacionales. En 1910, ningún sueco, fronterizo del gran coloso del Imperio Alemán, ponía en duda que el precio de la madera y el mineral de hierro se fijaba en los mercados internacionales y no en Sundsvall.

En los años cuarenta, Paul A. Samuelson, economista norteamericano, reelaboró el descubrimiento sueco para transformarlo en el “factor de igualación de precios”. Encontró pocos compatriotas que le prestaron seria atención. Cuando los economistas estadounidenses miran a su alrededor no suelen percibir influencias internacionales evidentes sobre su economía doméstica. El comercio con cualquier otro país asciende sólo a una diminuta fracción del producto nacional bruto norteamericano.

Estos aislacionistas deberían aprender de Jonathan Swift y advertir que una economía que no considere el resto del mundo se halla en quiebra desde un punto de vista técnico.



Atada por finas ligaduras globales, la economía de los EE.UU. se parece a Gulliver

Cuando Gulliver despertó de su siesta en Liliput, sus minúsculos habitantes lo habían atado al lecho con cuerdas asimismo finísimas. “Intenté levantarme, pero no pude ni moverme; porque, al haberme acostado sobre la espalda, me ví fuertemente atado de brazos y piernas. Mi cabellera, larga y espesa, también la habían amarrado con pareja solidez. Mi cuerpo entero, de las axilas a los muslos, sufría idéntico aprisionamiento por una maraña de finas ligaduras. Sólo podía mirar al cielo.”

Las sutiles ligaduras de la economía mundial son el comercio de automóviles de lujo entre el Japón y los EE.UU., los vínculos empresariales entre Londres y Nueva York o los directores financieros entre Zurich y Chicago. Por separado, cada atadura resulta insignificante. Pero las hay a miles. El gigante Gulliver, también conocido como Tío Sam, sólo puede mirar hacia arriba.

Gracias al efecto Gulliver, la política monetaria de los EE.UU. se “hace” en los mercados mundiales. Dejar que el dólar flote con respecto a otras divisas reporta a Washington alguna libertad, pero en tanto en cuanto los inversores mundiales tengan capacidad de elegir entre bonos del Tesoro norteamericano y sus contrapartidas del Bundesbank o del

Banco Central japonés, la Reserva Federal estadounidense no puede ignorar al resto del mundo. Además, flote o se fije el dólar, la estructura de los precios —incluidos salarios y tipos de interés— viene establecida por el tirón de miles de ligaduras internacionales.

El efecto Gulliver condiciona no sólo la política económica, sino también la libertad con que los economistas norteamericanos pueden ignorar al resto del mundo al elaborar sus propuestas. Los modelos a gran escala de la economía mundial, que gozaron de aureola científica en los años sesenta y se emplean todavía para predicciones más o menos romas, acostumbran pasar por alto los lazos que vinculan los precios en los EE.UU. con los de otros lugares. Ni siquiera las clases de introducción a la economía penetran en tal interconexión. Los teóricos estadounidenses sobre el desarollo económico omiten, en su mayoría, la incidencia de las importaciones y exportaciones. Cuando se refieren a los monopolios, piensan en la industria doméstica, como si Volkswagen y Toyota nunca hubieran existido. Más o menos lo que le ocurriría a un modelo de la energía a escala planetaria que ignorase la radiación recibida del Sol o la reemitida al espacio.

Desde los años setenta, un grupo de economistas norteamericanos, aunque creciente todavía pequeño en número, se ha esforzado por abordar precios y salarios, no desde la óptica de la oferta y la demanda doméstica, sino desde la influencia de factores de origen externo. Jeffrey Williamson, economista de Harvard, ha venido trabajando sobre los efectos de la economía mundial en los salarios norteamericanos a lo largo de los últimos cien años; sin ese condicionamiento no se entendería lo ocurrido recientemente.

Al proceder así, los economistas no hacen más que volver a las raíces de su disciplina, establecidas en la era de Swift, cuando todavía no había una superpotencia que dominara ella sola el comercio mundial. En 1817, David Ricardo admitía en sus *Principia* económicos que el comercio internacional determinaba los precios y salarios, de la misma manera que las órbitas planetarias quedan fijadas por el Sol. En cambio, cuando en el siglo XIX surgió el nacionalismo, los economistas empezaron a creer que cada planeta podía escoger su propia órbita. Ahora los hechos han empezado a recordarles que no es así. De la misma manera que los físicos aprendieron los límites de una mecánica basada en hipótesis idealizadas sobre cuerpos perfectamente elásticos y sin rozamiento, los economistas están aprendiendo a mirar más allá de sus propias fronteras.

DONALD N. MCCLOSKEY

Supercable cerámico

Del laboratorio al mercado

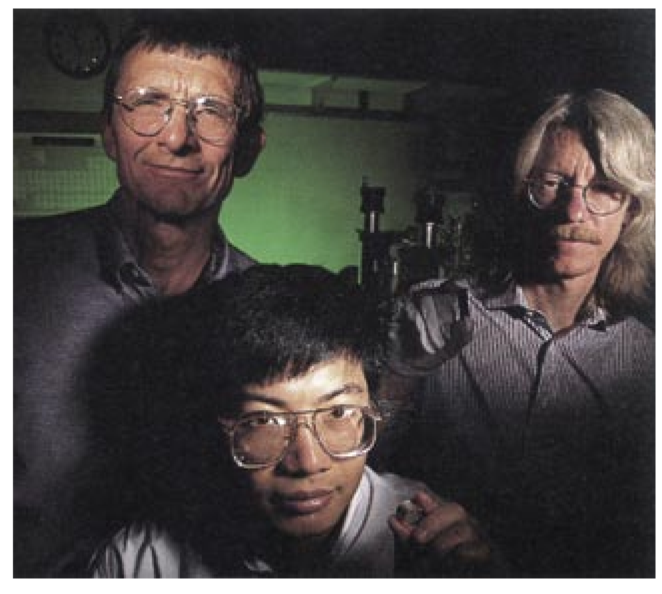
Las cerámicas conductoras de altas temperaturas, cuyo descubrimiento en 1986 sorprendió a los físicos de materiales, no han dejado de inquietarlos desde entonces, tales son las dificultades que encuentran para transformarlas en algo útil. Investigadores del Laboratorio Nacional de Los Alamos podrían, quizá, haber roto ese maleficio al resolver un importante problema de uno de los materiales más prometedores.

Recurrieron a la técnica de deposición asistida por haces iónicos, que habían desarrollado los expertos de Fujikura, centro de alta tecnología en el Japón. Basados en ella, el equipo estadounidense ha creado una cinta superconductora que funciona a altas temperaturas y en el seno de intensos campos magnéticos. Si lograra fabricarse a un coste económico, la cinta se convertiría en el conductor soñado para tantas y tan dispares aplicaciones: pequeños y potentes motores y generadores, controladores eléctricos y limitadores de circuito de mayor rendimiento y máquinas de creación de imágenes por resonancia magnética con más alta resolución.

Las cerámicas superconductoras despertaron en un comienzo una enorme expectación; permitían el paso de corriente sin resistencia a unas temperaturas muy por encima de las habituales en los superconductores existentes. Cifradas en torno a los 90 kelvins, tales temperaturas son más altas que la del nitrógeno líquido y, por consiguiente, más baratas de obtener. Hasta entonces, los superconductores debían enfriarse hasta unos pocos grados por encima del cero absoluto, lo que resulta extremadamente caro.

Pero uno de los superconductores más prometedores en técnicas de punta, el óxido de cobre, itrio y bario, presenta un grave inconveniente. No puede conformarse en cables porque cuesta lograr una conexión fácil entre sus granos cristalinos; los desajustes consiguientes entorpecen el paso de corriente. Hace unos años, a Yasuhiro Iijima, de Fujikura, se le ocurrió la feliz idea de depositar una capa de superconductor encima de una capa cristalina de material inerte orientada que alinearía los granos de superconductor, con lo que éstos pudieran acoplarse mejor. El problema está en producir la capa orientada de cristal. Se puede conseguir "chisporroteando" circonio estabilizado sobre un substrato de níquel, mediante dos haces de iones de argón. El primer haz arranca el óxido de circonio de un blanco, y lo deposita sobre el níquel. El segundo haz está dirigido sobre el níquel a un ángulo preciso, que permite a los cristales de circonio unirse entre sí sólo en una orientación. Los iones de argón se encargan de arrastrar los átomos que se depositan donde no deben.

El grupo de Los Alamos ha venido trabajando sobre tal deposición asistida por haces iónicos durante dos años, hasta que ha logrado producir muestras de óxido de cobre,



La supercinta cerámica mostrada por los investigadores de Los Alamos Paul Arendt, Xindi Wu y Steven R. Foltyn

itrio y bario sobre circonio estabilizado, capaces de conducir más de un millón de ampères por centímetro cuadrado. Tal resultado centuplica el rendimiento de otros superconductores flexibles y multiplica por un 50 por ciento lo confesado por los japoneses. Las muestras tienen la forma de una cinta flexible que se puede arrollar en cable. Como el óxido de cobre, itrio y bario tolera campos magnéticos intensos, no parece que haya obstáculos físicos para las aplicaciones de alta potencia. Quedan por vencer, sin embargo, formidables obstáculos económicos: tamaño pequeño de la muestra y excesivo tiempo invertido. La técnica tiene un largo camino por delante antes de alcanzarse la fabricación industrial.

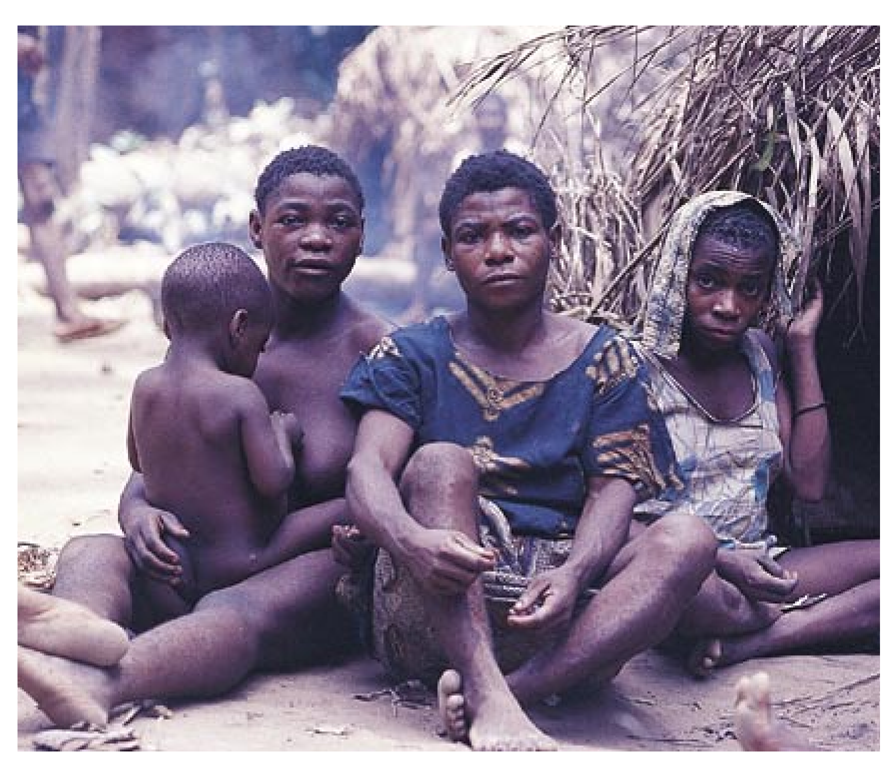
Otras cerámicas, así las basadas en óxido de bismuto, estroncio, calcio y cobre, son más maleables que la fundada en itrio, pero pierden su condición superconductora en el seno de intensos campos magnéticos a la temperatura del nitrógeno líquido.

Se especula en torno a posibles métodos para aumentar el rendimiento de la deposición asistida por haces de iones. Se ha hablado, por ejemplo, de recurrir a gases distintos del argón para acelerar el proceso. Otro camino sería emplear una capa de circonio más delgada: el grupo de Los Alamos emplea una capa de 0,5 micrometros de espesor, cuando los japoneses de Fujikura trabajan con una capa de sólo 0,1 micrometros. No sería de extrañar que los orientales se hubieran adelantado en la solicitud de patentes.

TIM BEARDSLEY

Nuevas epidemias

Virus Ebola



Los pigmeos de Lobaye, distrito de la República Centroafricana, están expuestos con regularidad al virus Ebola

Siempre que el virus Ebola sale de su escondite, como ocurrió el año pasado cerca de la zaireña Kikwit, los médicos se precipitan en auxilio de las víctimas y evitan en lo posible la diseminación del agente. Para entonces, sin embargo, suele ser demasiado tarde averiguar de dónde vino el virus. La rapidez con que mata el Ebola deja, por desgracia, pocas pistas. El caso índice (la primera persona que se infectó con el virus y lo pasó a los demás). Si los virólogos quieren saber más, deben trabajar entre episodios, atrapando y analizando todas las cosas vivas a la vista.

Paradójicamente, la búsqueda se hace ahora más difícil que tiempo atrás. Un equipo de los Centros para el Control y la Prevención de la Enfermedad de Estados Unidos analizó las cepas víricas aisladas en Zaire, Sudán, Costa de Marfil y Reston (Virginia), y comparó las secuencias génicas que codifican las moléculas de superficie vírica denominadas glucoproteínas. Los investigadores, que enviaron sus hallazgos a una prestigiosa revista científica el verano del año pasado, apuntan que la cepa responsable del último brote ocurrido en Zaire coincide con la que causó un incidente similar allí en 1976. Un fenómeno curioso si se considera que estos dos brotes estaban separados por unos 19 años y 1000 kilómetros.

La ausencia de mutaciones significativas durante este tiempo y a través de tamaña distancia indica que el virus ha permanecido estable en el mismo nicho durante mucho tiempo. Probablemente, el huésped (animal que alberga el virus Ebola y, sin embargo, no es sensible a la fiebre hemorrágica que causa en los primates) no migra. Por consiguiente, habría que acabar con él *in situ*, en Africa.

Y ahí reside el segundo reto. Los virólogos dispuestos a dar caza al huésped se han topado con problemas para conseguir financiación. Cuando los recursos debían haber llegado, no se le concedió importancia. Luego vino el flagelo del sida. Con todo, la Unión Europea ha aportado fondos para la investigación, a lo largo de la cual se han cosechado observaciones prometedoras: una cifra significativa de muestras séricas tomadas a pigmeos de Lobaye, distrito meridional de la República Centroafricana, unos 1000 kilómetros al norte de Kikwit, tenían anticuerpos contra el virus Ebola (demostrando que los pigmeos han estado expuestos en cierta medida al virus). Es muy probable que las tribus con un número relativamente alto de seropositivos estén en contacto regular con el huésped del virus o algún otro vector.

Reviste, pues, el mayor interés comprender su relación con el ambiente. Algunas de las tribus viven en el bosque durante la estación de lluvias, otras durante la estación seca y todas tienen estrategias de subsistencia ligeramente diferentes. El objetivo último es encontrar el denominador común entre esos grupos. No es una tarea pequeña, pero la recompensa puede ser grande. Esa gente, que ha vivido con la enfermedad durante mucho tiempo, podrían tener medios para tratarla y evitarla que a los virólogos se les escapan.

KRISTIN LEUTWYLER

Creaciones informáticas

Jean-Paul Delahaye

Un juego universal de herramientas de cálculo

A pesar de la abundancia y la diversidad de publicaciones científicas (libros, revistas, actas, reseñas e informes), ciertos acontecimientos cruciales de la historia de la ciencia no han dejado rastro escrito. La formulación de la llamada tesis de Church, debida a Alonzo Church, de Princeton, constituye uno de esos avances importantes y poco conocidos. Según recuerda Stephen Kleene, actor de primera fila junto con Kurt Gödel de ese momento histórico y a quien debemos la expresión "tesis de Church", Church propuso su idea un día de febrero de 1934. Tras algunas dudas, convenció a los lógicos de Harvard, entre ellos, en 1936, al propio Gödel, y fue universalmente aceptada algunos años después. La tesis de Church es objeto ahora de nuevo examen a la luz de las posibilidades que ofrecen los ordenadores cuánticos.

La tesis de Church responde a la cuestión siguiente: ¿cuál es el conjunto de útiles, el repertorio de operaciones, necesario para calcular los valores de las funciones calculables? Tenemos una noción intuitiva de lo que es una función calculable: aquella función f para la que existe un procedimiento sistemático (lo que se llama un "algoritmo") que permite conocer el valor $f(x)$ a partir del valor de x mediante una serie de manipulaciones precisas.

La tesis de Church afirma que los útiles necesarios para el cálculo de estas funciones *intuitivamente algorítmicas* pertenecen a una reducida lista de operaciones: igualdad, comparación, suma, diferencia y producto de números enteros; enunciados condicionales (si-entonces-de lo contrario-); órdenes de salto (ir a-); dar X; impresión de X, asignación ($x := y$). Las funciones calculables con este repertorio son, por definición, las funciones "programables". Según Church, toda función intuitivamente algorítmica es programable, y recíprocamente.

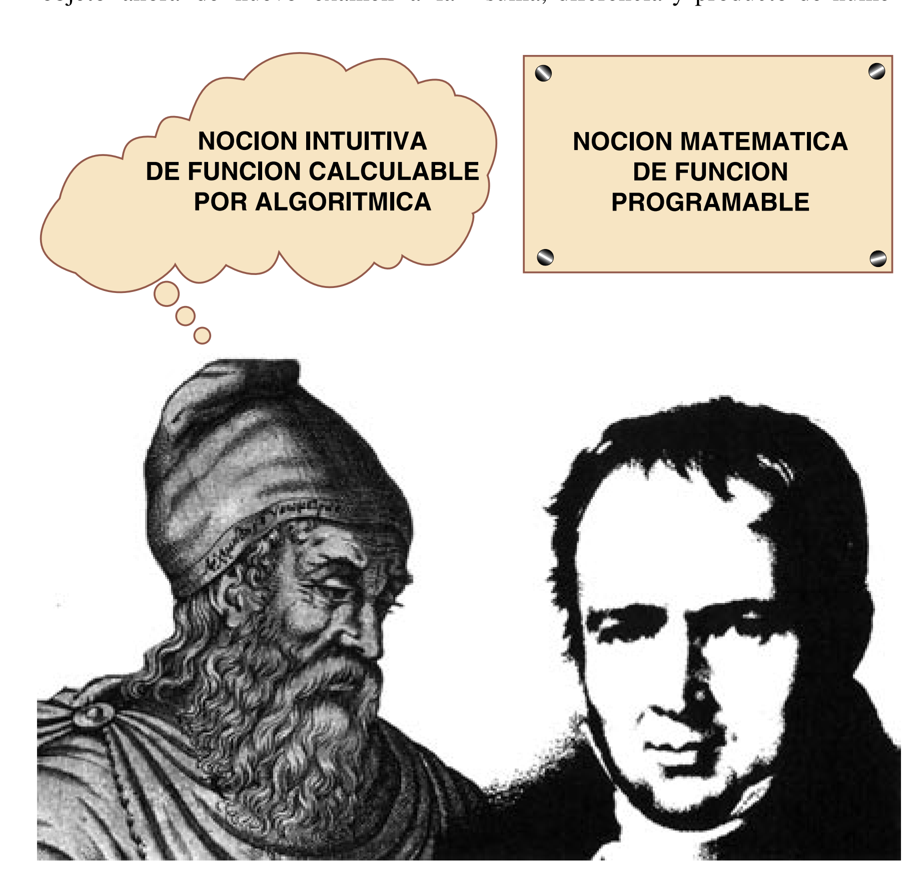
Esta afirmación desempeña en nuestros días un papel central en lógica y en informática, pues nos faculta para tratar con precisión los algoritmos y consiente la demostración de resultados negativos del tipo: "no existe ningún algoritmo que permita realizar esto o aquello."

Como le ocurre a toda identidad, la tesis de Church entraña dos vertientes. Por una parte, afirma que todos los cálculos que las máquinas pueden realizar con las operaciones de la lista indicada son cálculos factibles mediante algoritmos. Es cosa evidente, porque combinando las operaciones elementales sólo se obtienen procedimientos de cálculo discretos y bien definidos; vale decir, procedimientos algorítmicos. Una función programable es, por tanto, intuitivamente algorítmica.

La segunda vertiente de la tesis de Church afirma que todas las funciones calculables mediante una sucesión de etapas discretas requieren solamente el limitado lenguaje de programación antes descrito. Esta segunda parte no es en modo alguno evidente.

Podemos convencernos de diversas formas de que la tesis de Church es verdadera, pero nunca podrá demostrarse su veracidad, porque se trata de una afirmación filosófica, y en filosofía, una afirmación no queda jamás definitivamente demostrada. Examinemos algunos argumentos favorables.

El primero consiste en que nadie ha logrado preparar un ejemplo contrario, es decir, una función intuitivamente algorítmica para la cual no sea posible escribir el programa con el reducido lenguaje propuesto. El segundo argumento es que las extensiones (ejecutables en ordenador) del lenguaje de programación antes indicado (introducción de "mientras...", de "para n de 1 a X", etc.) pueden



1. "Piensan en lo mismo." La tesis de Church constituye la afirmación de la identidad entre una noción intuitiva y una noción matemática; no es, pues, una afirmación matemática demostrable. Solamente se puede argumentar en su favor o en su contra. Hoy nadie la pone en cuestión

reemplazarse siempre por las operaciones de la lista de Church. Todavía mejor, cuando se intenta formular otra definición matemática de la noción de función intuitivamente algorítmica, nos encontramos siempre la equivalencia con el conjunto de las funciones programables.

Uno de los argumentos más sólidos en favor de la tesis de Church ha sido propuesto por R. Gandy, quien ha demostrado que los mecanismos de todas las máquinas constructibles por la mecánica newtoniana no pueden calcular sino funciones programables. Gödel no quedó convencido hasta que se demostró un número suficiente de resultados de equivalencia. Los presentados por Alan Turing en 1936 desempeñaron un papel importante en la aceptación de la tesis de Church (tesis que en homenaje a sus trabajos suele conocerse por "tesis de Church-Turing").

En los primeros años de su formulación, la tesis de Church era "falsable": cualquiera hubiera podido proponer una noción no menos natural que la de función programable y que no hubiera coincidido con aquélla. Hubiéramos podido entonces optar entre dos formas de matematizar el concepto de función intuitivamente algorítmica, y hubiera sido forzoso elegir. Tal vez se llegasen a aceptar dos definiciones diferentes, que se utilizarían según los contextos (de igual forma que se ha llegado a la conclusión de que hay varias nociones naturales de número, cada una con su propio dominio de aplicación). Más que sorprendente, es milagroso que no haya sido así; es raro que en matemáticas se definan objetos de ubicuidad comparable a la de π (número que encontramos por doquier: en geometría, en análisis, en teoría de la probabilidad, en física, etc.). En general, ello significa que nos hallamos ante una noción importante y profunda.

Pero la tesis de Church no se reduce a una definición de la noción de función algorítmica. La situación se asemeja un tanto a la que se ha producido con la noción de plano. La afirmación de que la noción intuitiva de plano infinito es perfectamente modelizable por el conjunto de los pares de números reales, afirmación filosófica a la que podríamos denominar *tesis de Descartes*, ni es verdaderamente falsable, ni constituye una mera definición. Podría haber sido falsada al principio (si, por ejemplo, en lugar de pares ordenados, Descartes hubiera elegido ternas), pero una vez tenida por satisfactoria, se ha olvidado que la primera noción intuitiva de plano no aludía a pares ordenados de números reales. En nuestros días no se puede afirmar tampoco que la tesis de Descartes sea simplemente una definición de plano, que no es posible poner de nuevo en tela de juicio. Nuestra noción intuitiva de plano ha sido modificada por la tesis de Descartes, que ha desempeñado un papel fijador; de igual manera, la noción intuitiva de función algorítmica ha sido fijada por la tesis de Church.

Faltos de la tesis de Church, serían muchos los resultados de lógica que no tendrían más que sentido técnico. S. Shapiro llega a afirmar que la tesis de Church se propuso para posibilitar la generalización de los teoremas de incompletitud de Gödel. Cuando se dice que ningún sistema formal lo suficientemente potente puede demostrar su propia consistencia (formulación habitual del segundo teorema de incompletitud de Gödel), se está utilizando la tesis de Church. En efecto, para definir la noción de sistema formal se dice que es un lenguaje que permite escribir demostraciones algorítmicamente verificables (si no se especificase el sentido de "algorítmicamente verificables", el teorema sería falso). La noción de algoritmo que se adopta en este caso es la dada, obviamente, por la tesis de Church. En resumen, para formular las versiones más interesantes del teorema de Gödel hemos de aceptar la tesis de Church.

La tesis de Church no se ocupa, sin embargo, del tiempo de cálculo: con tal de que no sea infinito, en la definición de función programable no se tiene en cuenta el tiempo de cálculo, ni las limitaciones de memoria.

La tesis de Church no trata del continuo, porque se ocupa sólo de operaciones separables que actúan sobre objetos finitos, compuestos cada uno por elementos distintos, operaciones que se desarrollan cada una en tiempo finito (es decir, en un número finito de etapas discretas). Existen extensiones de la noción de algoritmo que consienten cálculos infinitos, continuos e incluso cuánticos, pero estas extensiones no conciernen a la tesis inicial de Church y no pueden ponerla en tela de juicio.

Existen tres variantes filosóficas —especulativas, diría yo— de la tesis de Church: mental, física y biológica. A tenor de la primera, reduccionista, existe identidad entre la noción de función calculable por una inteligencia y la noción de función programable (precedentemente definida con el instrumental de cálculo). La tesis de Church física afirma la identidad entre la noción de función calculable por un procedimiento físico y la noción de función programable. Por último, la tesis biológica se opone al vitalismo, sosteniendo la identidad entre calculable por un ser vivo y ser programable.

Quienes opinan que los procesos que se desarrollan en una inteligencia humana trascienden de la clase de las funciones programables no creen en la tesis de Church mental. Quienes afirman que las funciones que se pueden obtener en la salida de una máquina física no son necesariamente programables no creen en la variante física. Quienes, por último, atribuyen propiedades especiales a la materia viva y sostienen que los cálculos realizados por los seres vivos van más allá de las funciones programables no creen en la variante biológica. El lector, según su sensibilidad, puede adoptar algunas de estas tesis especulativas y no otras.

Las investigaciones efectuadas para evaluar estas tres variantes se resienten de un prejuicio: ¡nadie desea verse reducido a un lenguaje de programación! Otra dificultad para la evaluación de las tesis especulativas reviste mayor gravedad: todas las funciones calculadas por una inteligencia, una

PROGRAMA PARA CALCULAR | X³ – X – 13 |

```
DAR X,
Y:=X*X*X–X–13,
SI Y>0 ENTONCES Z:=Y DE LO CONTRARIO Z:=–Y,
IMPRIMIR Z
DETENCION
```

PROGRAMA PARA CALCULAR EL M.C.D. DE DOS ENTEROS

```
DAR X, DAR Y
(*) SI X=Y ENTONCES (IMPRIMIR X, DETENCION),
   DE LO CONTRARIO
      (SI X<Y ENTONCES Y:=X
      DE LO CONTRARIO X:=X–Y),
   IR A (*)
```

2. *Ejemplos de funciones programables. Las funciones programables solamente utilizan las operaciones siguientes: igualdad* (=)*, comparación* (>, <)*, adición* (+)*, sustracción* (–) *y multiplicación* (*) *de enteros, si-entonces-de lo contrario-; órdenes de salto (ir a-); introducción de* X*; impresión de* X*, asignación* (x : = y)*. Un lenguaje más potente (es decir, que entrañe otras operaciones) no aumentaría el número de funciones calculables, porque, con las operaciones básicas aquí consideradas, se pueden programar las otras operaciones*

máquina o un ser vivo tienen apariencia finita, en el sentido de que tan sólo conocemos un número finito de valores. Ahora bien, para toda función que sólo posea un número finito de valores existe una función programable que toma esos mismos valores; nada impediría, pues, concluir tras experimentaciones psicológicas, psíquicas o biológicas, que lo calculado es el resultado de una función programable. En consecuencia, las tres extensiones especulativas de la tesis de Church son infalsables e indemostrables: quienes traten de argumentar en contra no pueden tener éxito, pero quienes las defiendan no llegarán jamás a convencer a los escépticos. Jamás demostraremos de forma definitiva que las inteligencias, las máquinas o los seres vivos puedan calcular otra cosa que funciones programables, y tampoco se podrá jamás dar la demostración inversa.

El debate sobre las versiones especulativas de la tesis de Church está bloqueado y condenado a la repetición infinita de los mismos argumentos banales (por ejemplo, los que apelan a la creatividad del hombre). Por mi parte, dejaré aquí la discusión, prefiriendo abordar un aspecto mucho más ameno de las reflexiones sobre la tesis de Church.

Imaginemos máquinas capaces de algo más que cálculos finitos. Si tales máquinas llegasen a crearse algún día, el estudio matemático que se haya podido hacer será útil; en el ínterin, se trata de un juego de lógica.

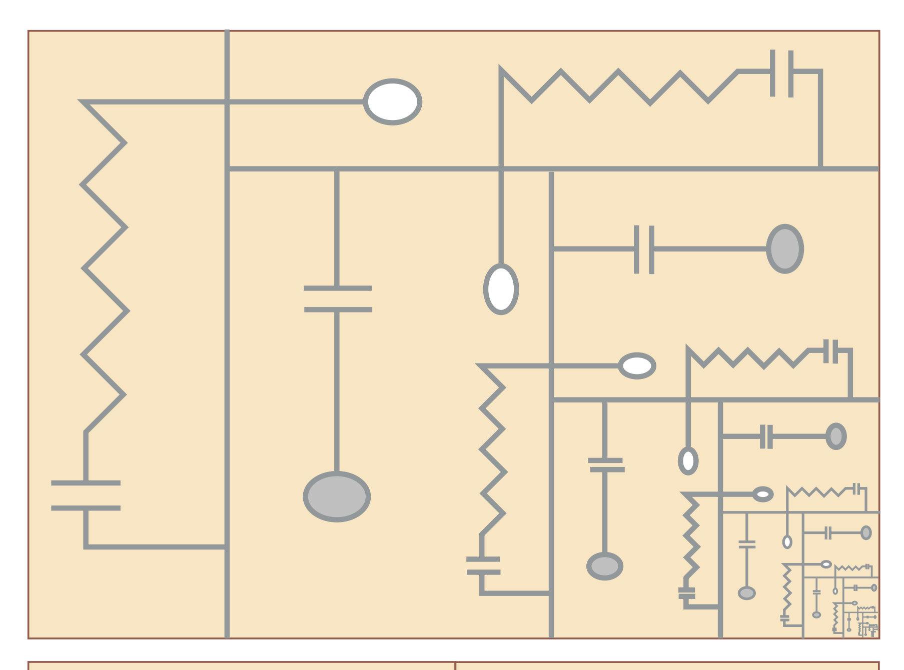
Supongamos que pudieran acometerse cálculos infinitos en un tiempo finito. Con tal propósito, un circuito especial, llamado infinitador, dedica un segundo a efectuar la primera suma, medio segundo a la segunda, un cuarto a la tercera, etc. En dos segundos, tal circuito habría efectuado una infinidad de sumas. Con máquinas provistas de circuitos infinitadores resulta posible generalizar la noción de algoritmo, dando cabida a los algoritmos infinitadores. De tal generalización emerge una tesis de Church infinitadora, pues los lógicos han puesto a punto una clase de funciones matemáticas (análoga a la clase de las funciones programables) compatible con esta noción de algoritmo infinitador.

Kleene, Gödel, Tarski, M. Davis y E. Post han identificado una clase de funciones que corresponde a la idea de cálculo infinitador: la clase de las funciones aritméticas. Para ello, a las operaciones anteriores se añade la noción de bucle infinito: “para *i* desde 0 a infinito.” La tesis de Church infinitadora afirma entonces: existe identidad entre la noción intuitiva de función discreta calculable por un procedimiento algorítmico infinitador y la noción de función aritmética. Lo mismo que la tesis clásica, esta tesis es tenida por verdadera.

Mas, por potentes que sean, los algoritmos infinitadores no pueden hacer todo. Los únicos objetos que manipulan son discretos y finitos (no tienen posibilidad de manipular números reales, con su infinidad de cifras decimales). Además, resulta fácil ver también que las funciones aritméticas constituyen un conjunto infinito numerable (se dice que un conjunto es contable o numerable cuando es posible numerar sus elementos 1, 2, ...) Ahora bien, como existe una infinidad no numerable de funciones (demasiado grande para ser enumerada con los números enteros), existen funciones no aritméticas, esto es, funciones que ningún algoritmo infinitador puede calcular.

Aun cuando su capacidad de cálculo sea limitada, los algoritmos infinitadores resolverían multitud de cuestiones matemáticas pendientes. En particular, si nos fuera posible construir máquinas infinitadoras, todas las preguntas de la forma: “¿Es la fórmula *F* consecuencia de la teoría *T*?” podrían quedar resueltas; sería suficiente enumerar todas las demostraciones posibles de la teoría *T*, y mirar si alguna demuestra *F*.

Estos últimos años, la noción de máquina continua ha suscitado notable interés. Los objetos manipulados por estas máquinas ya no son necesariamente objetos finitos, descomponibles en un número finito de fragmentos,



PROGRAMA PARA SABER SI EXISTEN NUMEROS PRIMOS GEMELOS MAYORES QUE N

```
DAR N,
R:=NO
PARA M DE 0 A INFINITO
   (SI N + M Y N + M + 2 SON NUMEROS PRIMOS
   ENTONCES R:=SI),
 IMPRIMIR R,
DETENCION
```

PROGRAMA PARA SABER SI EXISTE UNA INFINIDAD DE NUMEROS PRIMOS GEMELOS

```
G:=NO
PARA N DE 0 A INFINITO
(R:=NO,
PARA M DE 0 A INFINITO
   (SI N + M Y N + M + 2 SON NUMEROS PRIMOS
   ENTONCES R:=SI),
G:=R),
 IMPRIMIR G,
DETENCION
```

3. La tesis de Church infinitadora indica que las funciones calculables por máquinas dotadas de circuitos infinitos, como el representado arriba, es la clase de funciones calculables con programas que utilicen bucles infinitos del tipo: “para n = 0 *hasta infinito” (estas funciones se denominan funciones aritméticas). De existir tales máquinas (lo que es harto improbable), podríamos estudiar fácilmente conjeturas matemáticas clásicas. Tal es caso no sólo del último teorema de Fermat (cuya demostración ha completado Andrew Wiles), sino también de la conjetura de que existe una infinidad de pares de números primos que se diferencian en dos, como 11 y 13*

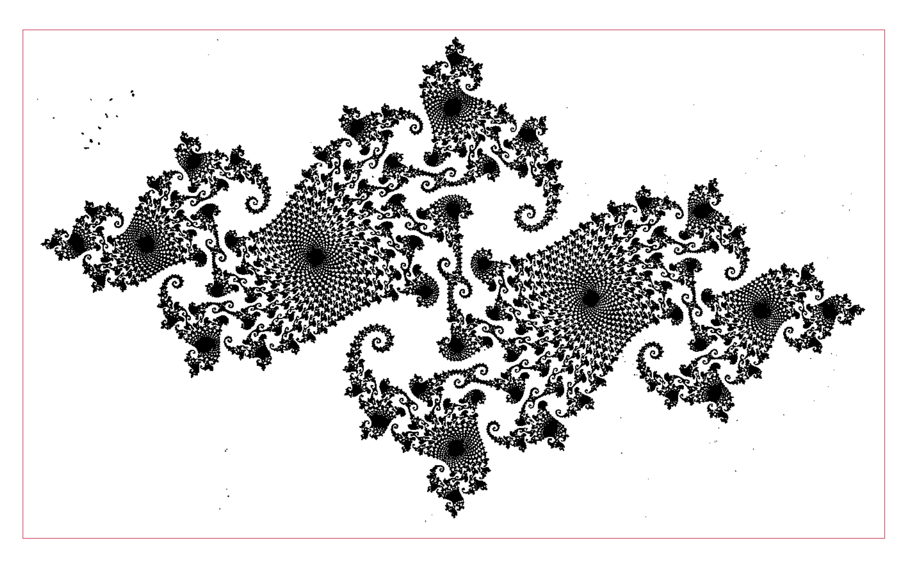
sino que pueden ser números reales cualesquiera. No se admiten, sin embargo, bucles infinitos.

Suponemos que estas máquinas son capaces de sumar y multiplicar sin error dos números reales, lo que no es muy realista, pues en el mundo físico ningún proceso permite la representación y manipulación exacta de números con infinitos decimales. La teoría de ordenadores continuos, por interesante que sea desde el punto de vista matemático, parece tan alejada de la realidad física que los propios físicos prefieren las extensiones cuánticas de los ordenadores clásicos.

En 1982, Richard Feynman se preguntaba si los ordenadores clásicos podrían simular a la mecánica cuántica, para concluir: ¿permite la mecánica cuántica ordenadores de nuevo tipo? La idea es más interesante que las dos extensiones precedentes, porque lo que sabemos del mundo físico nos lleva a pensar que no es razonable esperar la construcción de máquinas infinatadoras o continuas; en cambio, resulta imaginable la puesta a punto de ordenadores cuánticos. En 1985, David Deutsch propuso un modelo matemático de ordenador cuántico; tal modelo excede de nuestras capacidades técnicas actuales, pero en 1993 S. Lloyd formuló ya proposiciones para la realización técnica de ordenadores cuánticos que podrían prosperar en un futuro próximo.

Los ordenadores cuánticos sacan partido de la posibilidad de superponer varios estados —por ejemplo, superponer el estado de la memoria (0, 1, 1) y el estado (1, 0, 1)— y de realizar a continuación un cálculo sobre esta superposición de estados, lo que equivale a realizar varios cálculos al mismo tiempo. Parece, pues, interesante. Sin embargo, la extracción de resultados del cálculo superpuesto presenta dificultades a causa del principio de incertidumbre de Heisenberg, que prohíbe la separación de las distintas componentes del resultado obtenido. Esta situación llevó a los investigadores a preguntarse si los ordenadores cuánticos podrían dar mejores resultados que los ordenadores clásicos.

Se sabe que la respuesta es positiva. Antes de precisar de qué manera, empecemos señalando que la clase de funciones que puede calcular un ordenador cuántico (según la definición que da Deutsch) no es diferente de la clase de las funciones programables (lo cual, de hecho, constituye un argumento en favor de la seriedad del modelo de ordenadores cuánticos). No procede, pues, formular una tesis de Church especial, como en el caso de los ordenadores infinitadores. Lo que se puede esperar de un ordenador cuántico no es que calcule funciones no programables, sino que realice los cálculos más rápidamente: con un ordenador cuántico, la ganancia en velocidad que se podría obtener con respecto a un ordenador clásico podría ser exponencial.



4. Las máquinas continuas de Blum Shub y S. Smale, por extraordinarias que puedan ser, no lo pueden todo. El conjunto representado es un conjunto de Julia, a saber, el conjunto de los puntos $z = x + iy$ *tales que la sucesión* $z(0) = z$, $z(n+1) = z(n)2 + c$ *(con* $c = -0{,}74543 + 0{,}11301\ i$*) no se aleja hacia el infinito. Los ordenadores clásicos no pueden facilitar sino representaciones aproximadas de los conjuntos del plano, aunque se trate de conjuntos simples. Las máquinas continuas de B. Shub y S. Smale, que efectúan cálculos exactos con números reales, logran representar exactamente ciertos conjuntos sencillos del plano, como los discos. A pesar de todo, no pueden representar los conjuntos de Julia; lo cual demuestra que los conjuntos fractales son más complicados que los otros*

En 1994, Peter Shor estableció el resultado siguiente: la factorización de enteros (es decir, el cálculo del conjunto de divisores de un número) puede obtenerse en tiempo polinómico con una máquina cuántica. Se trata de un resultado notable, porque con las máquinas clásicas no se sabe realizar la factorización en tiempo polinómico, lo que patentiza la superioridad de las máquinas cuánticas sobre las clásicas. Otros resultados recientes de Deutsch, R. Jozsa, G. Brassard, A. Berthiaume y D. Simon dejaban presagiar tal resultado.

Señalemos también que no se ha demostrado que la factorización sea imposible en tiempo polinómico con las máquinas clásicas: solamente hacemos constar que encontramos algoritmos en tiempo exponencial. Los especialistas en la cuestión estaban, empero, persuadidos hasta tal punto de que la factorización no era factible en tiempo polinómico en un ordenador clásico, que ciertos sistemas de criptografía (como el famoso RSA de R. Rivest, A. Shamir y L. Adleman) se basan en la dificultad de la factorización. Una consecuencia del resultado de Shor es, por tanto, que en cuanto sepamos construir ordenadores cuánticos, todos los sistemas de criptografía matemática fundados en la factorización habrán de ir a la basura.

Gilles Brassard (que, juntamente con algunos otros investigadores, ha propuesto métodos de criptografía cuántica) hace notar que la mecánica cuántica está tocando a muerto para casi toda la criptografía contemporánea... a excepción, desde luego, de la criptografía cuántica.

Puede que los viajes que remontan el tiempo no sean del todo imposibles; tales viajes permitirían imaginar un ordenador de nuevo tipo. Estos *ordenadores temporales* efectuarían un cálculo, transferirían el cálculo a un segundo antes, lo cual, por iteración de la operación permitiría calcular cualquier función (calculable) en un abrir y cerrar de ojos: ningún método de criptografía matemática resistiría... más de un segundo. En realidad, los físicos no están seguros de que tales viajes sean posibles y los obstáculos técnicos reservan a estos hipotéticos ordenadores temporales para dentro de varios siglos, en el mejor de los casos.

Taller y laboratorio

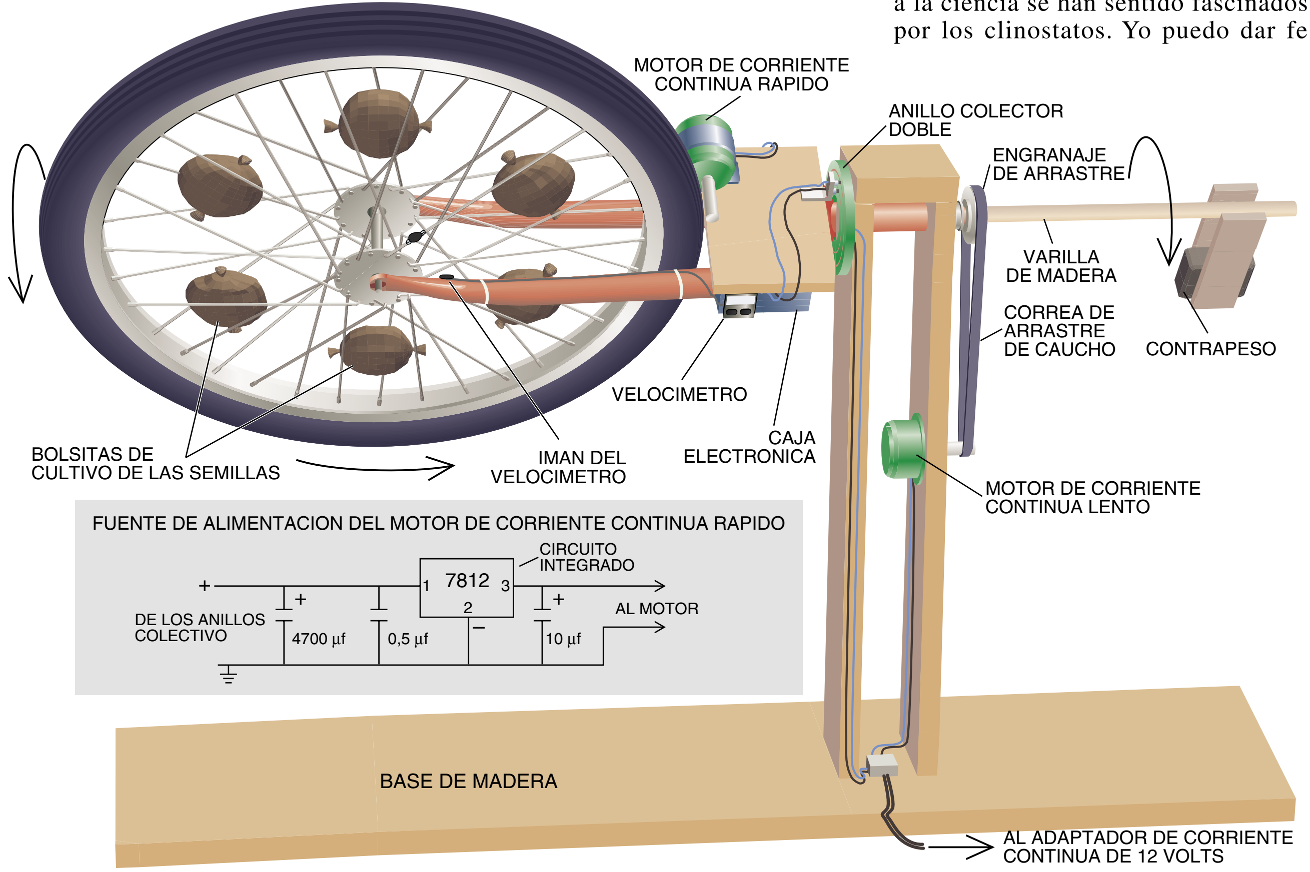
Shawn Carlson

Cultivando plantas de semillero por debajo de 1 g

Cuando tumbamos una planta, sucede algo extraordinario. En la parte inferior de sus raíces y tallo empiezan a congregarse unas hormonas especiales llamadas auxinas. Las auxinas estimulan el crecimiento y la división de las células del tallo. La base del tallo crece más que la región apical, por cuyo motivo el tallo se dobla hacia el cielo. En las células de las raíces las auxinas actúan de modo distinto: retardan el crecimiento. Entonces, las células pobres en auxinas contiguas al ápice de la raíz crecen más que las células ricas en auxinas contiguas a la bases, y la raíz se dobla hacia abajo. De este modo, una planta colocada boca abajo se ajusta internamente para realinearse con la atracción gravitatoria.

Los botánicos llaman geotropismo a la reacción de las plantas a la gravedad. A comienzos del siglo pasado los experimentadores exploraron el geotropismo cultivando plantas montadas en ruedas giratorias, exponiéndolas así simultáneamente a la gravedad terrestre y a fuerzas centrífugas. Las plantas crecían entonces en sentido contrario al vector de la fuerza resultante; o sea, en sentido contrario al de las fuerzas combinadas.

Pero los botánicos no tardaron en averiguar que las plantas reaccionan a la gravedad de modo un tanto perezoso. La mayoría de las plantas deben permanecer boca abajo al menos cinco minutos antes de que las auxinas comiencen a redistribuirse. A finales de siglo se había inventado un aparato, llamado clinostato, que engaña a las plantas haciéndolas creer que están creciendo en una situación de gravedad casi nula. Los clinostatos siguen usándose todavía. Mediante una rotación lenta de la plántula, vertical y horizontalmente, el clinostato impide que ésta fije su atención en la gravedad; en consecuencia la plántula se desarrolla como si la gravedad no existiera en absoluto. Generaciones enteras de aficionados a la ciencia se han sentido fascinados por los clinostatos. Yo puedo dar fe



Una rueda de bicicleta puesta a rodar y voltear puede convencer a las semillas contenidas en bolsas encajadas entre los radios de que están germinando a bordo de una nave espacial. Al construir el circuito de la fuente de alimentación del motor rápido, hay que asegurarse de que el condensador de 4700 microfarads se encuentra por lo menos a cinco centímetros del microcircuito integrado 7812

de los experimentos realizados por mi abuelo, publicados en la edición matriz de esta revista.

Extraña la escasa atención que los fisiólogos vegetales han prestado a la que acaso sea la zona más interesante para investigar, o sea, entre 0 y 1 g (la aceleración debida a la gravedad, que origina un aumento de velocidad de 9,8 metros por segundo cada segundo). Buena noticia para los aficionados, pues un poco de dedicación puede depararnos descubrimientos originales.

La plataforma rotatoria que se describe aquí es una rueda de bicicleta. Eligiendo convenientemente la velocidad de rotación de la rueda y colocando las semillas a diferentes distancias del eje de giro, puede el lector conseguir que las semillas germinen bajo distintas gravedades. Observe los umbrales a los cuales las plantas empiezan a reaccionar a la gravedad y compruebe cómo se desarrollarían en Marte (unos 0,4 g) las semillas. Es también necesario voltear la rueda. La gravedad terrestre se promedia entonces a cero, de suerte que las semillas experimenten sólo la aceleración centrífuga debida a la rotación.

Ya tenemos las ruedas. Hay que procurarse, además, otras partes del armazón de la bicicleta; en particular, la horquilla delantera y su árbol hueco que se desliza por el tubo-eje (que es la pieza por la que pasa la caña del manillar). Yo las conseguí muy baratas en un taller de reparación de bicicletas.

El armazón y las ruedas descansan en piezas de madera. Practique un orificio en los extremos superiores de dos tablas de estantería de pino (dos o tres centímetros de grueso) y fije los extremos inferiores en una base de pino, de tal modo que las tablas queden de pie (*véase la figura*). Inserte el árbol de la horquilla por los orificios. El engranaje de arrastre pruebe a buscarlo en el departamento de fontanería de un almacén de ferretería. Se construirá uno excelente cortando cinco centímetros del extremo de un tubo de plástico o goma de gran diámetro. Dentro de este aro circular encaje un tapón de madera por cuyo centro abra un orificio y luego inserte el conjunto sobre el árbol y fíjelo con epoxia.

Ahora introduzca una varilla, a través del engranaje, en el árbol. Sujete a la misma un contrapeso, como los que emplean para sus cinturones los escafandristas. Atornille al extremo de la varilla una tablilla de madera de unos ocho por dieciocho centímetros y a ésta ate temporalmente el contrapeso. Coloque la rueda de suerte tal que la curva de las horquillas apunte hacia arriba. Deslice la varilla por el interior del árbol y ajuste la posición del contrapeso, tanto horizontal como verticalmente, hasta que la rueda quede equilibrada sobre su soporte más cercano. Fije con epoxia la varilla y asegure con tornillos el contrapeso.

Para anular los efectos de la gravedad, la rueda de bicicleta debe dar aproximadamente un volteo por minuto. Yo empleé un motor lento (0,28 revoluciones por segundo, o rps) y conecté el eje de éste al engranaje de arrastre con una correa de goma lisa (eche un vistazo en la sección de herramientas mecánicas del almacén de ferretería más cercano). Así enlazado, el engranaje de arrastre rotó a la velocidad apropiada. Si el motor le gira a una velocidad muy distinta de 0,28 revoluciones por segundo, deberá tantear con las medidas del engranaje o añadir otro engranaje al eje del motor que le permita conseguir la desmultiplicación adecuada.

Un segundo motor, más rápido, hace que la rueda gire para crear la gravedad artificial. Para ello empleé un motor de corriente continua de 12 volts, que gira a 192 rps. Asegúrese de que el bandaje de la rueda es suave; buen resultado dan los neumáticos de las bicis de paseo. El radio del eje de salida del motor es del orden de un milímetro. Para calcular a qué frecuencia debe girar la rueda, consulte el recuadro.

En mi clinostato la rueda tenía un radio de 30 centímetros; a 192 rps, el motor la hacía girar a 0,64 rps. La eficacia del motor puede incrementarse arrollando dos o tres capas de cinta de tela alrededor del manguito de salida; este material extra aumenta la frecuencia de la rotación hasta 1,5 rps. La energía procede de un adaptador de corriente continua y alimenta al motor a través de dos anillos colectores. El circuito que se representa en el esquema de la figura regula la potencia.

Un velocímetro de bicicleta comercial le permitirá comprobar fácilmente la aceleración. Hágase con uno de los que emplean un imán que se coloca en un radio de la rueda. Instalado cerca del eje de giro, el imán puede medir la velocidad con una precisión de 0,1 kilómetros por hora.

Tan reducido es el trabajo realizado en esta área que le será posible cultivar cualquier cosa y descubrir algo nuevo. Yo me he centrado en el maíz. Dejé que las semillas germinaran durante algunos días y luego medí la longitud total de los brotes y su “angularidad”, o suma de los ángulos de curvatura para toda una cepa. A 1 g, las plántulas crecen perfectamente derechas; en las cercanías de 0 g, se tuercen bastante. Cultivar estas plántulas de semillero en distintas ubicaciones a lo largo de los radios de la rueda le permitirá observar los efectos de la “influencia” de la gravedad en el seno de las plantas.

Introduzca cinco semillas en un puñadito de tierra para macetas y métalas en la pierna de una media de nailon

Cálculo de la fuerza gravitatoria

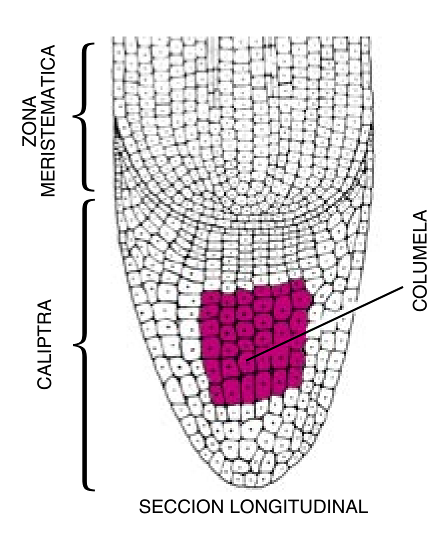
Una semilla instalada en la rueda giratoria experimenta una aceleración centrífuga $(2\pi f)^2 r$, donde f es la frecuencia de la rotación y r la distancia de las plántulas al eje de giro. La fórmula que determina a qué frecuencia hay que girar la rueda de bicicleta es $f = 1/2\pi\sqrt{(a/r)}$, donde a es la aceleración. Por ejemplo, para reproducir 9,8 metros por segundo cada segundo (1 g) en la llanta de una rueda de 0,3 metros de diámetro se requiere que la rueda gire a 0,91 rps.

La frecuencia f_w a la que el motor acciona la rueda es $f_d(r_m/r_w)$, donde f_d es la frecuencia del motor de arrastre (192 rps), r_m es el radio del eje de salida del motor (un milímetro aproximadamente) y r_w el radio de la rueda.

Para hallar la aceleración a cualquier distancia del centro de la rueda, emplee la fórmula

$$a = 7{,}72 \frac{v_{kph}^2}{r_w} \frac{r}{r_w}$$

donde r y r_w se expresan en centímetros y v es la lectura del velocímetro expresada en kilómetros por hora.



Porción terminal de la raíz, donde se registra el fenómeno del gravitropismo, o geotropismo. La caliptra presenta en su centro las células de la columela, capaces de detectar la gravedad

vieja. Corte el tejido a uno y otro lado del puñado de tierra y ate los extremos con un poco de bramante para formar una pequeña bolsa. Estos paquetitos de poco peso guardan bien las semillas y facilitan su riego. Para confeccionar una estadística útil y válida, hemos de conseguir 30 brotes para cada valor de la aceleración; habrá, pues, que colocar seis de estos manojos a la misma distancia del centro. Para que la rueda se mantenga equilibrada, dispóngalos simétricamente entre los radios. Podemos preparar más paquetes e insertarlos a diferentes distancias y experimentar así con varias aceleraciones simultáneamente.

Retire las semillas después de que hayan germinado durante tres a siete días (o hasta que empiecen a salirse de las bolsitas). Corte las plántulas por sus combaduras y luego extiéndalas colocándolas extremo con extremo, de modo que todas las combaduras se hallen en el mismo sentido. La angularidad es el ángulo que forman la primera y la última pieza. Para medir la longitud de una planta, extienda una cuerda a lo largo de la misma. Para cada aceleración, divida las angularidades por las longitudes de las plantas y calcule el valor medio. Represente gráficamente este valor en función de la aceleración y verá de qué modo reaccionan los sensores de las plantas ante distintos campos gravitatorios. Podría también considerar su plantación ulterior en condiciones normales y observar cómo se comportan posteriormente, o bien tratar de imaginar cuál sería la mejor planta comestible para cultivar en Marte.

Juegos matemáticos

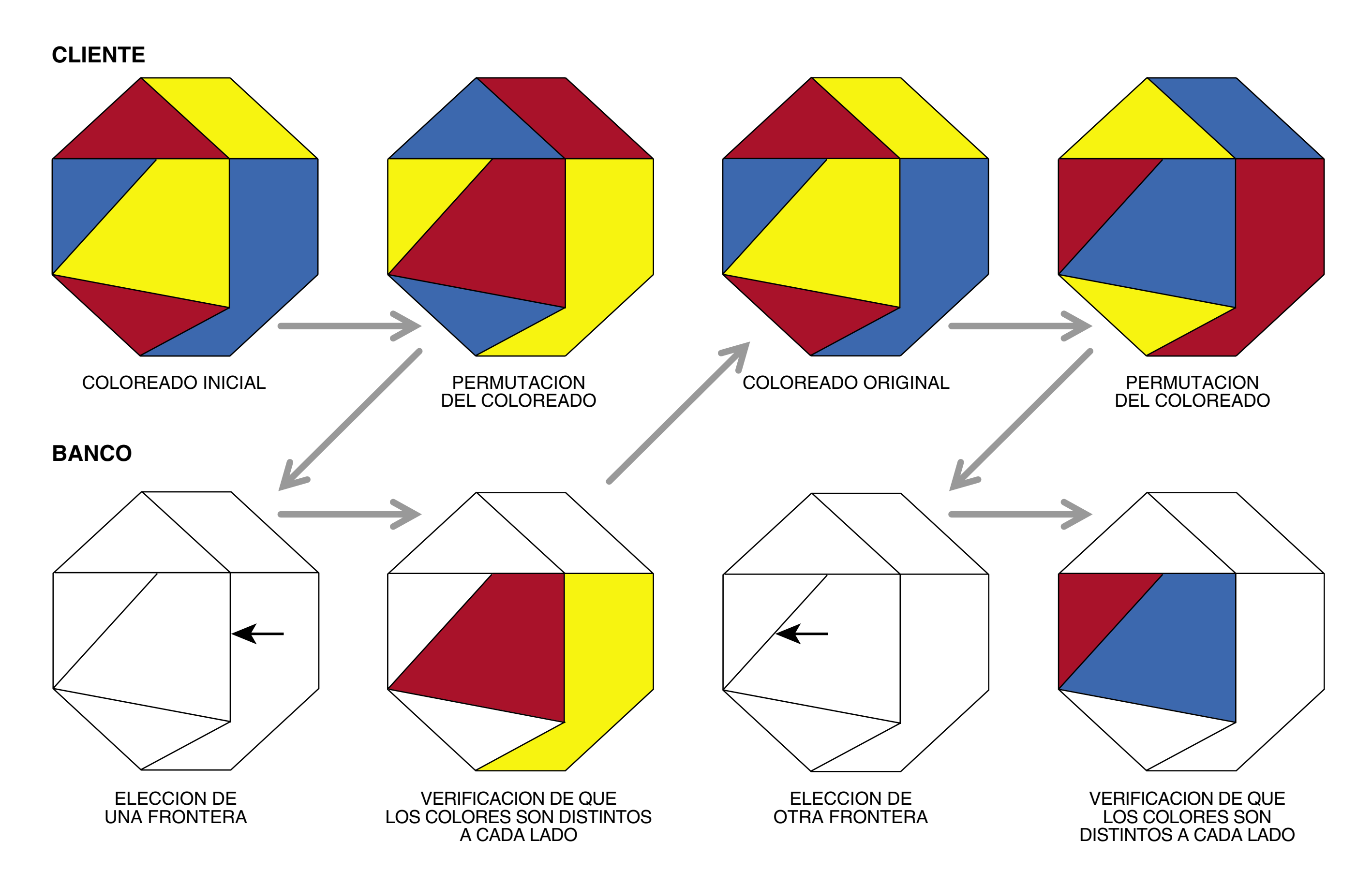
Ian Stewart

Recibo de compra en Internet

Supongamos que nos interese comprar algo a través de Internet, pagando con tarjeta de crédito. Si enviamos al vendedor el número de nuestra tarjeta, sin más, alguien podría interceptarlo y utilizarlo en beneficio propio. Igualmente podrían birlarnos el PIN (número secreto de identificación personal) de la Red. Para evitar tales problemas y otros que se resumen en la sección "Ensayo" de este mismo número, la mayoría de los sistemas de redes se valen de métodos de encriptación, que cifran o tornan ininteligibles los mensajes de índole confidencial. Si nadie consigue descifrar las claves, el mensaje codificado —un número de tarjeta de crédito, por ejemplo— permanecerá a salvo. Pero en Internet ha ido quedando cada vez más claro que no basta con eso. Aunque existen muchos códigos de encriptación seguros, los usuarios desean tener la prueba de que nadie podrá acceder a su información confidencial. La mejor manera de mantener un mensaje en secreto, es no confiárselo a nadie. Y lo que sorprende no poco, eso es justamente lo que nos permiten hacer los llamados protocolos de conocimiento cero.

El método nos permite convencer a cualquier persona —la directora de un banco, por ejemplo— de que realmente poseemos un determinado elemento de información, como un número de identificación personal, sin llegar a revelar la información propiamente dicha. El principio subyacente a los protocolos de conocimiento cero queda muy bien ilustrado por un tipo de problemas llamado "coloreado de mapas". En 1852, Francis Guthrie, de la Universidad de Londres, enunció por vez primera una conjetura conocida por "teorema de los cuatro colores", que afirma que todo mapa bidimensional puede colorearse con no más de cuatro colores sin que haya dos regiones adyacentes de un mismo color. Hubo de transcurrir más de un siglo hasta que, en 1976, Kenneth Appel y Wolfgang Haken, de la Universidad de Illinois, demostraron el teorema valiéndose de un ordenador.

Dados menos de cuatro colores, solamente ciertos mapas se pueden colorear de modo que los países fronterizos sean de distintos tonos. Supongamos ahora que la directora de nuestro banco nos envía un mapa



El protocolo de conocimiento cero aquí mostrado permite convencer al banco de que el cliente sabe colorear un mapa con tres colores. En el banco, para estar seguros, sólo tienen que comprobar que los colores son distintos a cada lado de las fronteras

Un ejemplo de transferencia indiferente

Lo mismo usted que la directora de su banco conocen dos números primos, p y q, y por tanto, su producto, n. Una fuente independiente y de toda confianza les proporciona a ambos una secuencia de dígitos binarios, a partir de la cual pueden construirse cualesquiera números aleatorios que requiera el protocolo. En tal caso, usted puede convencer a la directora del banco de que conoce p y q, sin revelarlos, como sigue:

1. La fuente independiente genera un entero aleatorio x y le envía a usted y al banco el resto r de la división de x^2 entre n (es decir, $r = x^2$ mod n).
2. De acuerdo con la teoría de números, r tiene exactamente cuatro raíces cuadradas distintas en módulo n. Usted puede valerse de su conocimiento de p y q para hallarlas. Una de ellas es x; las otras tres son $n - x$, y , y $n - y$, para cierto valor de y. (No existen algoritmos eficientes para hallar estas raíces cuadradas sin conocer p y q; empero, p y q se deducen fácilmente a partir de las cuatro raíces.)
3. Usted elige al azar uno de estos cuatro números; llamémoslo z.
4. Se toma al azar un entero k y se envía al banco el entero $s = k^2$ mod n. A continuación, usted calcula dos números, a y b, de modo que $a = k$ mod n, y $b = kz^z$ mod n. Los números a y b se envían al banco por transferencia indiferente.
5. La directora puede leer uno y solamente uno de los dos mensajes. Comprueba que el cuadrado mod n del número leído es o bien s (si es que ha leído el mensaje a) o bien rs (si lee el mensaje b).
6. Los pasos anteriores se repiten T veces. Al final, el banco sabe, con probabilidad $1 - 2^{-T}$, que usted conoce la factorización.

Observemos que el banco no envía ninguna comunicación de vuelta: el protocolo no es interactivo.

complejo y que nosotros queremos convencerla, sin mostrar directamente el resultado, de que somos capaces de colorearlo con sólo tres tonos. Imaginemos después que podemos construir un dispositivo electrónico conectado a dos pantallas tactosensibles, una en el banco y la otra en nuestro domicilio [*véase la figura*]. Programamos primero nuestro coloreado en esta máquina, por ejemplo, tocando con el dedo regiones específicas de nuestra pantalla: un toque para indicar rojo, dos para el azul y tres para el amarillo. Entonces, la funcionaria del banco selecciona una frontera entre dos países. La máquina permuta al azar nuestro sistema de coloreado, trocando sistemáticamente, quizá, los países rojos en países azules, los azules en rojos y dejando intactos los amarillos. La pantalla del banco muestra los nuevos colores de los dos países que comparten la frontera seleccionada. Si nuestro coloreado inicial era válido, estos dos colores serán diferentes.

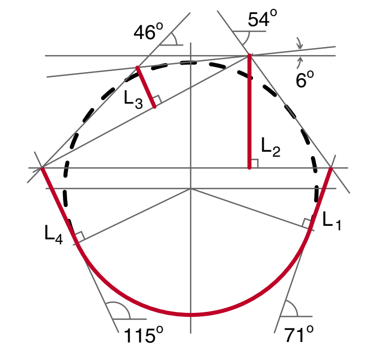
Repitiendo esta operación con cada frontera, el banco puede comprobar si realmente teníamos un mapa tricolor, como declarábamos. Si nuestro coloreado inicial fuese defectuoso y dos países vecinos tuvieran el mismo color, cuando el banco seleccionase la frontera que los separa comprobaría que los dos colores permutados también son idénticos. Por el contrario, si los colores permutados son diferentes al cruzar todas las fronteras, nuestro mapa original sería válido. Dado que la máquina elige al azar una de las seis permutaciones de color posibles, el banco no puede deducir nuestro coloreado original; meramente puede confirmar que era correcto.

Los especialistas en protocolos de conocimiento cero prefieren un argumento más riguroso, basado en un proceso de "simulación". Imaginemos un sistema falso que va eligiendo diferentes colores al azar, en lugar de permutar los elegidos por nosotros. Este falso sistema podría generar muchas secuencias distintas de pares de colores; una de ellas sería la secuencia de respuestas basada en nuestro mapa. Supongamos por un instante que en el banco pudieran determinar nuestro mapa a partir de las respuestas ofrecidas por el sistema auténtico. Entonces, el banco podría determinar también nuestro mapa cuando, en ocasiones excepcionales, el falso sistema produjera estas mismas respuestas. Mas para el sistema falso nuestro mapa no existe, así que tal deducción tiene que ser imposible. Si en el banco no pueden deducir de las respuestas de la máquina por qué colores hemos optado, nadie podrá.

Un protocolo de conocimiento cero más elaborado nos permite convencer a los funcionarios del banco de que conocemos dos divisores primos, p y q, de un número n determinado. Suponiendo que n sea francamente grande —de un par de cientos de cifras, pongamos por caso— no se conoce ningún algoritmo capaz de hallar sus factores primos en la duración del universo. Sí existen, en cambio, algoritmos para verificar que los divisores p y q son primos. Así

Acuse de recibo

John Day, de Columbus, en Ohio, me envió una serie de cartas acerca del "Sucio robo en Aldeatétrica" (noviembre de 1995). Day empezó por hallar una solución que tenía dos zanjas y una longitud total de 481,89 metros; mejorando así la mencionada en el "Acuse de recibo" de febrero pasado. Su segunda carta presentaba una solución todavía más corta con tres zanjas. Y en su tercera, otra solución con tres zanjas todavía mejor, cuya longitud total es 479,98 (*que vemos a la derecha*). ¿Tiene algún lector una solución con cuatro zanjas? *—I. S.*



LONGITUD DE LAS ZANJAS

L_1 = 52,05 METROS	L_4 = 68,73 METROS
L_2 = 87,88 METROS	ARCO = 237,36 METROS
L_3 = 33,96 METROS	TOTAL = 479,98 METROS

pues, la funcionaria de nuestro banco puede preparar dos números primos, calcular su producto y considerar a estos números primos como un PIN (número de identificación personal) que nos serán facilitados cuando abramos una cuenta. A través de un canal de comunicaciones idóneo, podríamos convencer al banco de que conocíamos los PIN, sin divulgar los números ni al banco ni a ninguna otra persona.

Por canal de comunicaciones idóneo entiendo uno de los llamados canales de transferencia indiferentes, que permiten enviar al banco dos elementos de información de modo tal que sólo se pueda leer uno de ellos [*véase el recuadro*]. No sabemos cuál de ellos será el legible. Podemos construir un canal de transferencia indiferente utilizando teoría de números. (Pueden verse más detalles en *A Course in Number Theory and Cryptography*, por Neal Koblitz, publicado por Springer-Verlag en 1994.) El método requiere utilizar dos números de 100 cifras en lugar de las cuatro habituales del PIN. Existen, sin duda, otras estrategias más prácticas. Pero su descripción resulta más difícil.

Hace dos siglos, Carl Friedrich Gauss, uno de los más grandes matemáticos de todos los tiempos, fundador de la teoría de números, calificó a su criatura de "reina de las matemáticas". Las reinas son majestuosas, aunque decorativas, matiz que no se perdió en Gauss. Hace sólo veinte años, la teoría de números, que estudia los números enteros y sus propiedades, se reputaba la menos práctica de todas las ramas de la matemática: pensamiento puro llegado de la torre de marfil; hermosa pero inútil.

En nuestros días, la teoría de números se está pagando el pasaje en el mundo del comercio, merced a los ordenadores y a las comunicaciones modernas. La información digital consiste en realidad hecha números. Por esta razón, los procesos realizados por medio de información digital —caso de los métodos de codificación— son casi inevitablemente aplicaciones de la teoría de números. Las demostraciones de conocimiento cero y los protocolos de transferencia indiferente son meramente dos de entre las múltiples y curiosas ideas emergidas desde las profundidades de la teoría de números.

En cuanto ciencia aplicada, la teoría de números ha tardado en arder; pero ahora las chispas están empezando a volar.

Libros

Nicolás García Tapia, David Jou, Luis Alonso, y Ramón Margalef

Ciencia china

Tradición milenaria

THE SHORTER SCIENCE AND CIVILISATION IN CHINA: 4, por Colin A. Ronan. Cambridge University Press; Cambridge, 1994.

Cuando se visita la China actual es difícil sustraerse a la admiración que producen sus grandes obras milenarias. Un recorrido por la impresionante muralla de más de 6000 kilómetros, o un viaje en barca por el Gran Canal, permiten apreciar el sustrato de una esplendorosa civilización. Si se comparan las fechas en que estas obras se construyeron, se advierte que se trata de las mismas en las que Europa iniciaba su etapa oscura de la Edad Media.

Es un hecho conocido el que algunas invenciones como la brújula, la pólvora, la imprenta y la industria de la seda proceden de China. En los barcos castellanos, guiados por la brújula y protegidos por la pólvora, llegaron a América muchas invenciones orientales.

A pesar de la clara superioridad técnica china hasta el año 1400 d. C., pocas historias de la ciencia y de la técnica han tenido en cuenta la aportación de los antiguos imperios orientales, hasta el reciente y monumental trabajo de Joseph Needham sobre la ciencia y la civilización en China. Solamente en 1932 Lefebvre des Noëttes hizo un cuadro con las invenciones medievales, indicando claramente que muchas de ellas provenían del este de Asia. En los años cincuenta, Lynn White deshacía el tópico de que la técnica medieval europea provenía exclusivamente del mundo helenístico y romano, estableciendo que muchos descubrimientos procedían de los pueblos bárbaros del Norte, así como de Bizancio, el Próximo Oriente y, en una forma nada desdeñable, del Extremo Oriente. En los mismos años, y desde el punto de vista de la historia de la economía, M. Greenberg arguía que "hasta la época de la producción mecanizada, cuando la supremacía técnica permitió a Occidente modelar el mundo en una economía única, era el Este el más avanzado en algunas artes industriales".

El voluminoso trabajo de Joseph Needham y sus colaboradores, titulado *Science and Civilisation in China*, ha permitido el conocimiento de las aportaciones científicas y técnicas de las civilizaciones del Extremo Oriente y es una herramienta indispensable para el historiador de la ciencia y de la técnica a la hora de situar un descubrimiento y conocer su inspiración en el mundo del Asia oriental.

Por este motivo, es de agradecer el esfuerzo de Colin A. Ronan —un activo historiador de la técnica y colaborador de Needham— para abreviar y hacer asequible a todo tipo de lectores la obra monumental de su maestro.

El libro objeto de esta reseña es el volumen 4, que corresponde al tomo IV, parte 2 de la obra original de J. Needham. Abarca, en principio, la época que correspondería a nuestra Edad Media, aunque también se tratan los siglos precedentes y los posteriores cuando se hace necesario para conocer la evolución de la máquina o instrumento que se está estudiando. Faltan aquí los molinos y las instalaciones hidráulicas de la época, que se dejan para el próximo volumen, por la importancia que tuvieron en China en este período.

En este cuarto volumen se analiza, de una forma asequible, pero sin perder en ningún momento el rigor científico, el estatuto de los ingenieros en China, sus herramientas y materiales. Después se pasa revista a los principios básicos de la mecánica oriental, con la descripción de las máquinas movidas por animales, hombres e incluso por el vapor; es una lástima, sin embargo, que entre los antecedentes occidentales de esto último no se hayan mencionado los ingenios del español Ayanz, patentados medio siglo antes que el instrumento descrito en el libro. Es interesante el capítulo referente a los vehículos para el transporte por tierra. Se habla de la relojería china, desconocida entonces en Occidente, siendo muy detallada la descripción del famoso reloj de Su Song. Hay unos curiosos capítulos dedicados a máquinas e instrumentos que se mueven con el viento o se elevan gracias a él; aquí se incluyen, no sólo los molinos de viento, sino los antecedentes chinos de la moderna aeronáutica. Se analiza el origen oriental de elementos mecánicos tan utilizados ahora como la biela-manivela, el diferencial o la llamada suspensión Cardan. En la aplicación práctica, son notables también los avances chinos en el atalaje de los animales de tiro, anteriores en varios siglos a los occidentales. En suma, este libro permite hacer comprender al lector occidental la inmensa deuda que nuestra tecnología tiene con la antigua civilización china. (N. G. T.)

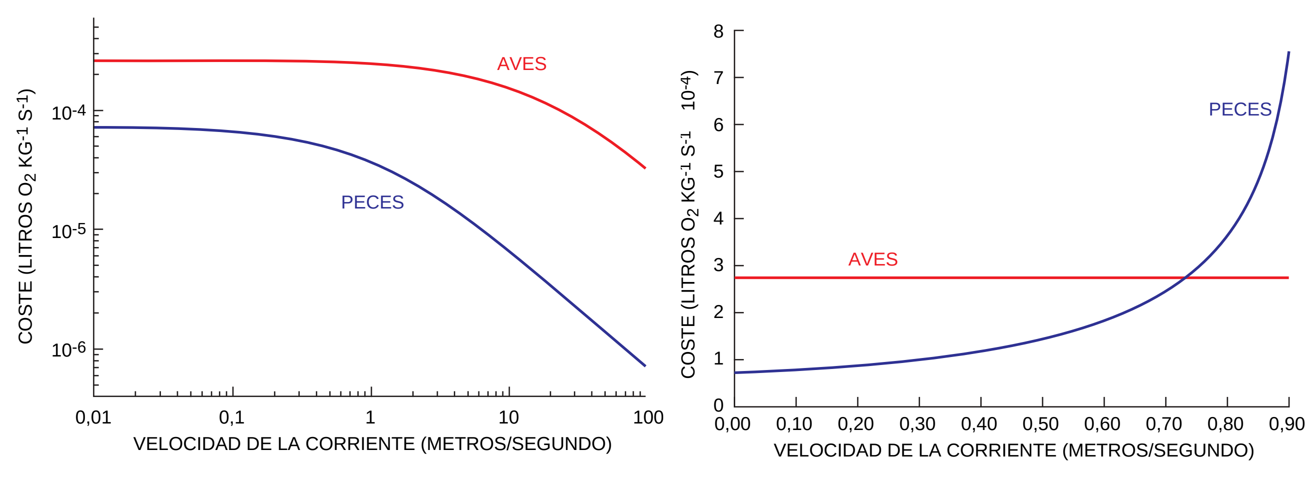
De la física

A la biología

AIR AND WATER AND PHYSICS OF LIFE'S MEDIA. M. W. Denny. Princeton University Press; Princeton, 1993.

Aire y agua son los medios fluidos en que se desarrolla la vida. Las formas de los animales y de las plantas terrestres son muy diferentes, en general, de la de los animales y plantas acuáticos. Resulta, pues, evidente que el medio influye en la vida. ¿Cómo analizar y entender esta aparente obviedad? ¿Cómo desgranar, a partir de ella, un conjunto de preguntas pertinentes y fructíferas que nos ayuden a observar y a comprender? ¿Qué papel desempeña la física en esta tarea?

Aire y agua difieren notablemente en todas sus propiedades: densidad (en un factor mil), viscosidad (en un factor cien), en difusividad (en un factor diez mil), en conductividad eléctrica (en un factor de diez mil millones), en conductividad térmica (en un factor viente), en calor específico (en un factor cuatro), en compresibilidad (en un factor cien mil), en índice de refracción (en un factor uno y medio). ¿Cómo afectan estas grandes diferencias de propiedades físicas a los seres que habitan en el aire y en el agua? Este es, precisamente, el hilo conductor de este espléndido libro de física de fluidos aplicado a la biología.



1. Si el ave vuela en la dirección del viento, se reduce el coste invertido en el transporte

2. Si el pez nada contra la corriente, aumenta el coste invertido en el transporte

Cada capítulo de la obra dedica una buena parte a una presentación ágil y accesible de los conceptos físicos necesarios para el análisis del tema; los detalles matemáticos se han reducido por lo general al mínimo imprescindible para comprender el origen de las ecuaciones utilizadas en el texto. Una vez comprendida una situación simple, sin embargo, Denny no duda en escribir algunas expresiones de carácter mucho más general, cuya deducción detallada constituiría un imponente reto matemático, pero cuyo uso se revela muy rico para la comprensión de características físicas de interés. Se acepta, pues, que comprendidas las líneas generales de un tema no es imprescindible demostrar pormenorizadamente todas sus ecuaciones, sino saberles sacar el máximo partido.

El libro consta de quince capítulos. Después de una introducción a las ideas básicas, se abordan la densidad, viscosidad, difusión y propiedades térmicas. A continuación, se explica la forma en que las propiedades del medio determinan la percepción del entorno por el animal, a través del estudio de las propiedades eléctricas, la propagación del sonido y la de la luz. Por último, se expone la física de las interfases entre líquidos y gases, es decir, la tensión superficial, las olas y la evaporación. Las referencias a la biología son constantes. Así, se relaciona la densidad con la presión, la flotación y la locomoción; la viscosidad, con la locomoción de animales microscópicos y con el flujo en conductos; la difusión, con el metabolismo y las respiración; la propiedades térmicas, con el coste metabólico de mantener una temperatura dada en un ambiente determinado y con el coste térmico de la respiración; la conductividad eléctrica, con la detección eléctrica en el agua; el sonido y la luz, con cuestiones de visión y de audición y de estética; la tensión superficial, con el transporte de agua en las plantas; las olas y la evaporación, con problemas de ecología. La comparación entre medio acuoso y medio aéreo es una constante en el libro.

A título de ilustración, y para suscitar la curiosidad del lector, he aquí algunas de las preguntas concretas que se plantea el libro: ¿cómo limita la velocidad de las ondas de superficie la velocidad máxima de natación de los patos o de los insectos?, ¿hasta qué distancia los tiburones o las rayas pueden detectar eléctricamente los animales enterrados en la arena?, ¿cuándo resulta más conveniente a una célula moverse en busca de nutrientes o esperar que éstos le lleguen por difusión?, ¿cuál debe ser la porosidad de los huevos de gallina, de los de colibrí y de los de avestruz para que los respectivos embriones puedan respirar?, ¿cuál es el coste térmico de la respiración?, ¿qué relación hay entre el calor latente de evaporación del agua y el tamaño máximo de los animales?

Naturalmente, varios temas típicos de biofísica (conducción nerviosa o efectos de la radiactividad) no aparecen en el libro, ya que éste no pretende ser exhaustivo. Cada capítulo termina en un breve resumen de las principales ideas y con un aviso, bastante repetitivo por cierto, de la conveniencia de no tomar al pie de la letra los modelos simplificados propuestos. Pese a su valor pedagógico, el libro no propone problemas a final de capítulo. La bibliografía, en cambio, es muy extensa y atractiva. (D. J.)

La vida

Interpretaciones

WHAT IS LIFE? THE NEXT FIFTY YEARS. SPECULATIONS ON THE FUTURE OF BIOLOGY. Dirigido por Michael P. Murphy y Luke A. J. O'Neill. Cambridge University Press; 1995.

EPIGENETIC INHERITANCE AND EVOLUTION, por Eva Jablonka y Marion J. Lamb; Oxford University Press; Oxford, 1995.

DARWINISM AND SOCIAL DARWINISM IN IMPERIAL GERMANY: THE CONTRIBUTION OF THE CELL BIOLOGIST OSCAR HERTWIG (1849-1922), por Paul Julian Weindlung; Gustav Fischer Verlag; Stuttgart, 1991.

GENOME IMPRINTING. CAUSES AND CONSEQUENCES. Dirigido por R. Ohlsson, K. Hall y M. Ritzen. Cambridge University Press; 1995.

COMPREHENSIVE BIOCHEMISTRY. SELECTED TOPICS IN THE HISTORY OF BIOCHEMISTRY. PERSONAL RECOLLECTIONS. Dirigido por E. C. Slater, Rainer Jaenicke y Giorgio Semenza. Elsevier; Amsterdam, 1995.

Se ha dicho con sobrada razón que los cambios de rumbo de la biología contemporánea los marcaron los físicos. Para corroborarlo se cita el famoso librito de Erwin Schrödinger, conmemorado ahora en *What is life? The next fifty years. Speculations on the future of biology*. Conviene, sin embargo, no olvidar la larga trayectoria que había recorrido el tema desde Lamarck y la influencia en el austriaco

de la bioquímica de su tiempo. Hoy, como ayer, se trata de desentrañar las tres notas que se reconocen exclusivas de los seres vivos: autorreproducción, mutación y metabolismo.

De vez en cuando aparecen tímidas voces en pro de la explicación lamarckista de la evolución de las formas vivas, la transmisión hereditaria de los caracteres adquiridos. Voces que son pronto acalladas, porque, se aduce, ni hay pruebas de tal hipótesis ni es explicación necesaria. No comparten esa opinión Eva Jablonka y Marion J. Lamb, autoras de un sólido alegato que lleva por título *Epigenetic inheritance and evolution. The Lamarckian dimension*. Es la suya una adscripción no excluyente. Aceptan la evolución a través de la selección natural. Pero ponen en cuestión los pivotes sobre los que se asienta la teoría neodarwinista vigente, a saber, la aleatoriedad de todas las variaciones del material hereditario y la identificación de éstas con modificaciones en las secuencias de bases de ADN.

Afirmaba Lamarck que las leyes que operaban en la materia viva eran las mismas por las que se regía la materia inerte. La diferencia entre lo vivo y lo inerte residía en la organización. Cuando se presentaban ciertas condiciones, la materia inanimada se reorganizaba en materia viva. Las formas evolucionaban instadas por un doble mecanismo: una tendencia natural hacia la complejidad y una capacidad de reaccionar ante los estímulos del entorno.

Las primeras reticencias las encontró Lamarck en los medios fijistas de su tiempo. La crítica más demoledora la articuló August Weismann, al demostrar que los cambios en la línea somática nunca saltaban a la línea germinal. El lamarckismo fue perdiendo terreno, por mucho que los paleontólogos americanos y alemanes lo vieran reflejado en las series fósiles que iban apareciendo. Hubo más intentos de salvarlo.Yves Delage, Marie Goldsmith y otros biólogos entendieron el lamarckismo en un sentido amplio. Se producía herencia lamarckiana siempre que un carácter dependiente del estímulo en una generación pasaba a ser independiente del estímulo en las generaciones siguientes. Para Jablonka y Lamb, hay herencia lamarckiana si se cumplen cuatro condiciones: el entorno induce el cambio del carácter; el cambio inducido es específico y repetible; se produce un cambio específico en la información hereditaria, y el cambio se transmite a la generación siguiente.

La biología molecular ha terminado por reconocer que el genoma es un sistema fluido y poroso a las presiones del entorno. Ha confirmado también que la información encuentra varios canales para su transmisión por vía hereditaria. No todos los cambios son resultado de la selección darwinista entre variaciones aleatorias nacidas de mutación o recombinación génica. Para entender el curso de la evolución hay que atender también a los mecanismos de epigénesis, los responsables del desarrollo. Los sistemas de herencia epigenéticos permiten que las células con genotipos idénticos adquieran y transmitan fenotipos diferentes.

Contra la aleatoriedad de las mutaciones que defiende el neodarwinismo y en favor de la eficacia de la respuesta por la que aboga el lamarckismo se ofrece un descubrimiento reciente, el de las mutaciones dirigidas en bacterias. Ciertas variaciones heredadas surgen así de una respuesta directa al reto del ambiente. Coexisten, además, mecanismos lamarckistas con otros de corte darwinista en el fenómeno de la especiación. Otro caso de herencia epigenética que ha cobrado especial vigor es la impronta genómica.

Se hace difícil hablar de epigenética sin referirse a la obra fundante de Oscar Hertwig (1849-1922), cuya biografía intelectual escribió hace algunos años Paul Julian Weindling: *Darwinism and social darwinism in imperial Germany: The contribution of the cell biologist Oscar Hertwig*. Fernando Lorente de No tradujo en 1929 al español su *Génesis de los organismos* para la “Biblioteca de las ideas del siglo XX” que dirigía Ortega y Gasset, quien se basó en Hertwig para pergeñar su raciovitalismo.

Hertwig, heredero de la tradición de anatomía comparada de Johannes Müller, tuvo por mentores a Ernst Haeckel y Carl Gegenbaur, quienes reconciliaron la teoría del protoplasma —base física de la vida— con la interpretación de la morfología desde un punto de vista filogenético. Hertiwg empezó siendo darwinista cuando investigaba los estadios embrionarios de desarrollo para dilucidar cuestiones de filogenia. Pero fue apartándose de ese patrón, conforme iba trenzando su propia teoría del organismo como un estado celular cooperativo. Terminó mendeliano.

No atribuye la fecundación a las potencias formativas del protoplasma, sino que la entiende como la fusión de núcleos celulares. Reside en éstos, pues, la función hereditaria. *Omnis nucleus e nucleo*. En su opinión, la célula constaba de múltiples partículas químicas, organizadas unas y sin organizar otras. Las segundas, que se hallan libres o en solución, comprenden los albuminatos, grasas, hidratos de carbono, agua y sales. Sirven de material para la nutrición y crecimiento de la célula. Las partículas químicas organizadas forman los idioblastos, dotados de capacidad para multiplicarse y dividirse.

La biología alemana del último tercio del siglo XIX no fue ajena, en su afán por reconstruir la genealogía de las formas vivas, al enfoque historicista que dominaba en el mundo académico. La anatomía comparada permitía establecer la secuencia histórica de los organismos. La ley de Haeckel sobre la recapitulación ancestral marcó un hito en el esfuerzo por fundir historia con mecanismos cíclicos. Hertwig, al rechazarla, ponía en cuestión la visión monofilética del origen de la vida. Sustituyó la interpretación mecanicista de la fisiología por la continuidad histórica del crecimiento celular y los vínculos reproductores entre generaciones.

Con su hermano Richard confirmó el origen ectodérmico de las células ganglionares y de las fibras nerviosas. Ambos consideraron que las células desarrollaban nuevas facultades a medida que se diferenciaban, no antes. Relacionaron la estructura histológica con la función fisiológica de los órganos. Su fisiología reforzó las interpretaciones evolutivas de que el uso determinaba la estructura. El origen del mesodermo fue para los Hertwig la clave para resolver el problema del origen de las formas superiores, más complejas, de los tejidos.

De la epigénesis de ayer a la impronta genómica de los últimos años, bien representada en *Genomic imprinting. Causes and consequences*. El interés en este campo de investigación se acentuó al comprobarse que algunos aspectos de la herencia no seguían el patrón mendeliano. De acuerdo con éste, los genes autosómicos, presentes en dos copias en los organismos diploides, cumplen una función equivalente. Pero los experimentos de transferencia nuclear y el análisis de las anomalías cromosómicas pusieron de manifiesto que el genoma del padre y el de la madre no participaban por igual en la gametogénesis del hijo. En efecto, durante la gametogénesis se *imponen* diferencias funcionales, fenómeno que recibe el nombre de *impronta*.

El ejemplo más claro lo observamos en la inactivación aleatoria del cromosoma X en las hembras. En virtud de la misma, cada célula somática expresa los genes del cromosoma X

paterno o materno, pero no ambos. En el ratón, los genes *Igf2* y *Snrpn* se transcriben exclusivamente a partir del alelo paterno, mientras que *Igf2r* y *H19* se expresan a partir sólo del alelo materno.

Cuando se descubrió el fenómeno de la impronta se creyó que la expresión monoalélica de los genes con impronta se manifestaría en todos los tejidos en todas las etapas del desarrollo. Se ha podido ver, sin embargo, que muchos de los genes ahora caracterizados presentan expresión monoalélica sólo en ciertos tejidos, en ciertas etapas del desarrollo o en el seno de un subgrupo de población.

Conocemos ya una docena de genes con impronta, pero resulta difícil enhebrar una hipótesis general sobre el fenómeno. Coexisten, en efecto, varias teorías, la mayoría de las cuales adscriben a la impronta un papel conflictivo o protector. Se ha sugerido que la impronta derivaría del uso, de origen remotísimo, de la metilación para proteger a los organismos unicelulares frente a la invasión de ADN foráneo. En los mamíferos, la impronta constituiría un medio para proteger a las hembras contra los tumores trofoblásticos malignos que derivan de los óvulos partenogenéticamente activados. También, el genoma paterno en su egoísmo intentaría promover el desarrollo del feto.

Schrödinger procedía de Viena y Berlín, de un entorno que seguía de cerca la labor transformadora que los químicos alemanes estaban acometiendo. La influencia de éstos en *What is life*?, aunque no suficientemente destacada, es innegable. A ese tiempo nos transporta *Comprehensive biochemistry. Selected topics in the history of biochemistry. Personal collections. IV*. Colaboran en él A. A. Bayev, H. Beinert, P. N. Campbell, F. Gibson, E. J. M. Helmreich, F. Lynen, C. Rimington, R. N. Robertson, T. Wieland y B. Witkop. Con tres figuras en el horizonte: Heinrich Wieland, Otto Meyerhof y Richard Kuhn.

La bioquímica es el estudio molecular y atómico de la organización y función de los sistemas vivos. Se sirve de los conceptos y procedimientos de la química. Pese al intervalo bélico, los años transcurridos entre 1930 y 1945 resultaron sumamente fecundos para la disciplina. En cada volumen del *Biochemische Zeitschrift* aparecía un nuevo descubrimiento logrado por el Instituto Dahlem de Berlín. Se encontraron nucleótidos de flavoproteínas y piridina, se dilucidó su función en el transporte de hidrógeno y, con ello, se resolvió el problema de la implicación



Reunidos para reflexionar sobre el futuro de la biología, de izquierda a derecha: Stephen Jay Gould, John Maynard Smith, Lewis Wolpert, Stuart Kauffman, Roger Penrose, Gerald Edelman, Walter Thirring y Leslie Orgel

de las vitaminas en el metabolismo. En la segunda mitad de los años treinta se reconoció, principalmente en los laboratorios de Meyerhof (con K. Lohmann) y Otto Warburg, que el trifosfato de adenosina (ATP) era el portador general de energía y su agente de transferencia en la célula. En 1941, Fritz Lipmann explicaba el principio de "potencial de grupo" no sólo para el fosforil, sino también para otros grupos de acilación. A partir de mediciones de la producción de ATP en las mitocondrias vióse que esta molécula se formaba por oxidación de nutrientes a través de la cadena respiratoria.

Las autobiografías aquí recogidas conjugan los recuerdos personales con el progreso de la ciencia. Así leemos que si natural fue la vocación de Theodor Wieland, hijo del Nobel Heinrich Wieland, más singular resultó la de Feodor Lynen. "Cuando terminé el 'Abitur', no tenía idea clara de qué quería ser. Me atraían la medicina y la química. Al presentarme en la ventanilla de la secretaría de la universidad vi que la cola de alumnos que esperaban matricularse en química era la más corta. Así nació mi 'vocación'. Y así entré en el Instituto Químico de Munich, donde Heinrich Wieland había introducido el estudio de la bioquímica."

Lynen preparó su doctorado sobre el principio tóxico de *Amanita phalloides*. El estudio de sus propiedades químicas le permitió descubrir su naturaleza peptídica. El siguiente paso era obtener su cristalización, que le confirmaría además que había conseguido una purificación cabal. Abandonó la tarea al cabo de dos años de inútil esfuerzo, convencido de la existencia de moléculas orgánicas que no podían cristalizar. (Sin embargo, un mes más tarde Ulrich Wieland cristalizaba la faloidina.)

En colaboración con Max Borst, H. Wieland y él se embarcaron en el estudio de las reacciones de oxidación en las células tumorales. Estas degradan la glucosa incluso en condiciones anaerobias. Pero también respiran. ¿Cómo se produce dióxido de carbono a partir de los hidratos de carbono? En aquel entonces se creía que, bajo condiciones aeróbicas, las enzimas glicolíticas transformaban la glucosa en piruvato. Wieland se concentró en la idea de que el piruvato se oxida para formar CO_2 y acetato, este último sujeto a metabolización ulterior. Lynen se ciñó a la formación de acetato. Se habían producido ya tres descubrimientos fundamentales. Albert Szent-Györgyi había hallado el efecto catalítico de ácidos C_4-dicarboxílicos en la respiración de homogeneizados de músculo; Carl Martius encontraba la aconitasa y aclaraba el mecanismo de la oxidación del citrato. Por último, Hans Krebs integró esas observaciones en el ciclo del ácido cítrico. Se pudo demostrar la síntesis enzimática del citrato a partir de piruvato y oxaloacetato, postulándose que ocurría mediante una condensación oxidativa.

Con esos antecedentes y otros contemporáneos, Lynen supuso que el acetato, no el piruvato, era el socio de oxaloacetato en la reacción enzimática de la síntesis de citrato. Y se propuso

un doble objetivo: demostrar el funcionamiento del ciclo del ácido cítrico en las células de la levadura que oxidan acetato y sintetizar ácido cítrico *in vitro*. Su logro principal fue, sin embargo, identificar el ácido acético activado con *S*-acetil-CoA, tioéster que, en presencia de una enzima de condensación, efectúa la reacción del aldol con ácido oxaloacético en citrato. Piedra miliar de la investigación del metabolismo, constituía, además, el remate de una línea de trabajo que había comenzado 70 años antes y que podrían denominarse dinámica del metabolismo molecular.

La historia del hallazgo puede descomponerse, cual una vía metabólica, en varios pasos. Lipmann, descubridor del coenzima A, había aludido a la presencia de azufre, pero no le prestó mucha atención. Se sabía, además, que todas las reacciones enzimáticas en las que se hallaba involucrado el coenzima A requerían la adición de glutatión o cisteína. En tercer lugar, al químico Lynen no se le escapaba que los grupos sulfhidrilos eran más acídicos que los grupos hidroxilo, lo que significa que el ácido acético enlazado con el azufre debía tener las propiedades de un anhídrido ácido y éste, capacidad para acetilar aminas o alcoholes. El paso crucial consistió en unir esas tres cosas. Además ya se sabía que el ácido tioacético reaccionaba con anilina para formar acetanilida. No cabía duda de que el "acetato activo" tenía que ser un tioéster. Lynen aisló, tras dos meses de esfuerzo, acetil CoA procedente de levadura. Con el descubrimiento del enlace tioéster en acetil CoA, el enlace fosfato rico en energía había perdido su carácter de exclusividad en las reacciones metabólicas, y cabía esperar que se descubrieran otros enlaces ricos en energía.

Las previsiones que los autores formulan para el porvenir de la biología en *What is life? The next fifty years* se basan en las líneas hoy esbozadas. Algunos de ellos echan una mirada retrospectiva de mayor alcance. Se recrean en el recuerdo del papel de los físicos, de Pascual Jordan y Schrödinger sobre todo. Enderezaron el rumbo, se aduce, no porque aportaran algún descubrimiento decisivo, sino por el nuevo planteamiento de los principios físicos.

Como muchos biólogos actuales, Manfred Eigen cifra en la información el hilo conductor de la evolución. La selección no es un componente adicional que se active desde el exterior. La selección es una forma de autoorganización y, en cuanto tal, una consecuencia directa de la autoreproducción. La evolución, primero molecular, luego celular y, por último, del organismo, sólo fue posible a través de la reproducción y la selección. La evolución molecular implica un espectro amplio de mutantes. El tipo más adaptado, el tipo silvestre, está presente sólo en pequeña cuantía comparado con la población total. Sin embargo, el mayor número de mutantes se congrega en torno al tipo mejor adaptado. Los experimentos de clonación han revelado que el tipo salvaje corresponde en efecto a la media de un espectro de miríadas de secuencias alternativas. En esencia, esta población se compone de sólo aquellos mutantes que pueden reproducirse eficazmente, como se ha observado entre poblaciones víricas. En ese camino habrá de avanzarse, si queremos, en particular, hacer frente en los próximos años a la epidemia del sida.



Oscar Hertwig adolescente

Gould aprovecha su turno para identificar la naturaleza de la vida con un problema de jerarquía e historia. De acuerdo con la perspectiva jerárquica de la selección natural, los diversos niveles ascendentes en sistemas estructurales de inclusión —genes, organismos y especies— podrían actuar simultáneamente como focos legítimos de selección natural. Si las especies son unidades de selección por derecho propio, entonces la pauta evolutiva debe estudiarse en la plenitud de duraciones de las especies, esto es, directamente en el tiempo geológico. El problema de la vida es un problema de historia.

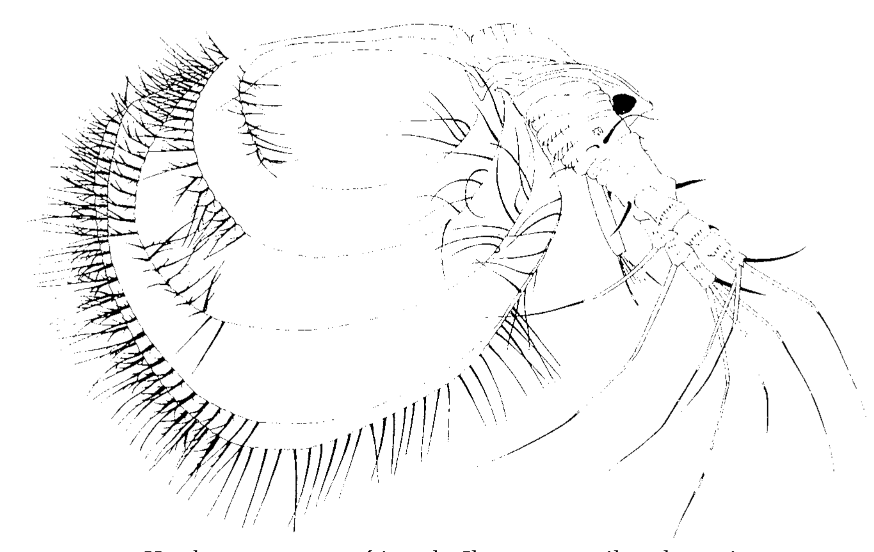
Aunque no se atiene estrictamente al guión, Jared Diamond presenta un ensayo sólido y sugestivo sobre la evolución de la inventiva humana. La antropología y la paleontología nos enseñan que somos únicos hoy y en la historia de la vida sobre la Tierra. Pero nuestra singularidad no es absoluta. Tenemos la anatomía de los primates, y las mismas o casi las mismas proteínas. Entre las proteínas secuenciadas hasta la fecha en los primates africanos y humanos —cinco cadenas de hemoglobina, mioglobina, citocromo C, anhidrasa carbónica y fibrinopéptidos A y B— en su mayoría ni siquiera exhiben la diferencia de un aminoácido entre especies, y el número total de cambios aminoacídicos es sólo de cinco en un total de 1271 restos secuenciados. Compartimos un 98,4 por ciento de nuestro ADN con el de dos especies de chimpancé, el común y el pigmeo. Además, el 90 % de nuestro ADN no es codificador. ¿Qué eran esos escasos genes para justificar esa diferencia conductual?

Un cerebro grande constituye una condición necesaria, aunque no suficiente. Nuestros antepasados adoptaron una postura erguida hace unos cuatro millones de años, el crecimiento evolutivo de nuestro cerebro comenzó hace unos dos millones y alcanzamos el grado de *Homo erectus* hace entre 1,7 y 0,5 millones de años. El primer *Homo sapiens* moderno en su anatomía —gente con nuestro esqueleto— vivió hace unos 100.000 años en Africa meridional. En ese período, Europa estaba ocupada todavía por los neandertales, cuyo volumen cerebral era mayor que el nuestro. ¿Crece la documentación arqueológica sobre la inventiva humana a la par que aumenta el volumen cerebral? No. Las herramientas neandertales de Rusia eran similares a las de Francia, al tiempo que los útiles neandertalenses de hace 140.000 años eran similares a los de hace 40.000 años.

Hace 38.000 años apareció en Europa occidental el primer *Homo sapiens* anatómicamente moderno (el Cro-Magnon). A partir de en-

tonces y a lo largo de las decenas de miles de años subsiguientes se suceden los hitos arqueológicos de la inventiva moderna: instrumentos musicales, pinturas rupestres, estatuillas, figuras de barro y joyería; tumbas para enterrar a los muertos, que hablan de una idea religiosa; represas; casas de suelos pavimentados, lámparas, hornos; transporte de mercancías, pinturas de Altamira y Lascaux.

Con todo, el rasgo más significativo que apareció en Europa occidental hace 38.000 años fue la propia inventiva. Los tipos de herramientas del neandertal no pueden clasificarse en estilos diagnósticos de tiempo y lugar. Por contra, las herramientas, el arte y otros productos culturales del Cro-Magnon varían notablemente de un milenio a otro y de una región a otra, de forma que los arqueólogos pueden emplearlos como indicadores de la edad del yacimiento. En Europa ocurrió, pues, un salto cualitativo en el comportamiento humano. ¿En qué consiste ese 0,01 % de nuestros genes que cambió durante un corto intervalo temporal y que causó el gran salto adelante? Sólo hay una hipótesis plausible: los genes responsables de la perfección del lenguaje hablado. La vida, en su expresión más elevada, se trueca en información hablada. (L. A.)



Hembra partenogenética de Ilyocryptus silvaeducensis

Fauna ibérica

Branquiópodos

CRUSTACEA BRANCHIOPODA, por Miguel Alonso. Museo Nacional de Ciencias Naturales; Madrid, 1996.

En otro número de "Investigación y Ciencia" dimos noticia de la aparición de esta serie de publicaciones y comentamos algunas características de los volúmenes aparecidos hasta entonces. Debemos congratularnos de la continuación de esta serie que concede preferencia a grupos taxonómicos poco conocidos o que hasta la fecha no habían sido objeto de monografías ni en España ni en los países más próximos vecinos.

Este volumen tiene un especial atractivo para el referente, pues se trata de un vasto grupo de crustáceos de agua dulce en cuyo estudio anduvo interesado muchos años, por lo que su único comentario personal es que hubiera deseado ser capaz de producir un volumen como el presente. Miguel Alonso ha recorrido toda España, estudiando la ecología y la fauna de las pequeñas lagunas, en gran parte temporales, que son características de porciones áridas de nuestro territorio y ha podido disponer también de más información sobre el plancton de los embalses españoles (también a través de las tesis doctorales de Juan Armengol y Damián Jaume). El resultado es una obra que admite comparación con las mejores monografías análogas producidas en cualquier país.

Son los branquiópodos un grupo muy antiguo y evolutivamente complejo de crustáceos entre microscópicos y medianos (los mayores son los *Apus*, que miden hasta 70 mm, excluidos los cercópodos) propios de toda clase de aguas estancadas. Unas pocas especies son marinas —y el Mediterráneo es uno de los mares más ricos en ellas, principalmente en su parte oriental— o de medios hipersalinos, como la conocida *Artemia salina*, cuya complejidad genética en nuestro país ha sido analizada por F. Amat y colaboradores. Su biología, su carácter de organismos de pequeño tamaño, pero de organización simplificada, y probablemente descendientes de otros mayores, así como frecuente reproducción partenogenética, les convierte en objetos interesantísimos de estudio desde el punto de vista de la evolución.

El número de especies enumeradas en cada uno de los distintos órdenes es: *Anostraca*, 11 especies; *Spinicaudata* (antiguamente llamados también *concostráceos*), 4 especies; *Ctenopoda*, 5 especies; *Anomopoda*, 83 especies; y *Onychopoda*, 6 especies, que antaño se reunían bajo la denominación de "cladóceros"; y *Notostraca*, 2 especies. Esta cifra de algo más de 100 especies no desmerece de las identificadas en territorios comparables.

Si hay que destacar algo excepcional en este volumen es la riqueza y calidad de la ilustración que, pudiéramos decir, muestra hasta el último pelo, que ciertamente puede ser importante desde el punto de vista de la taxonomía. Las ilustraciones son originales del autor y algunas de Damián Jaume. Con todo, recuerdo con cierta añoranza las figuras levemente entintadas de color que Alonso publicó en el volumen 9 de la "Historia Natural dels Països Catalans", (figs. 191, 192 y 194), que para mí conseguían expresar hasta la "personalidad" de las respectivas especies.

En el libro se proponen combinaciones nomenclaturales nuevas (*Isaura mayeti* (Simon) comb. nov., *Phrixura leei* (Chien) comb. nov.; se describen algunas novedades, además de las que recientemente ya se dieron a conocer en otras publicaciones, *Alona salina* sp. nov., *Alona orellanai* sp. nov. Se reúnen figuras de todos los machos conocidos de aquellas especies citadas para las que dicho sexo no se ha señalado todavía en España. Por fin, se ofrece una clave para clasificar los restos de branquiópodos, tal como se encuentran, en forma de escudos cefálicos, valvas, etc., en los sedimentos, y que constituyen buenos subfósiles indicadores de recientes cambios climáticos. (R. M.)

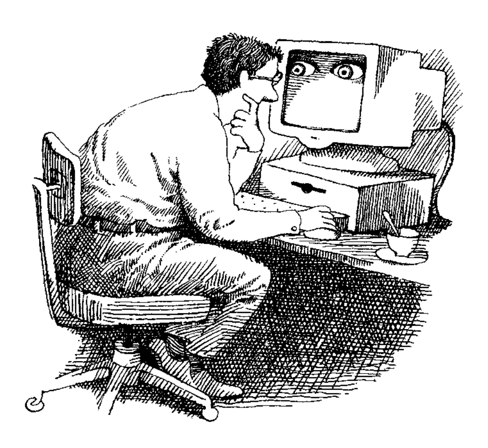
Ensayo

Philip Morrison

Respeto a la intimidad y recolección de datos en Internet

Se les conoce por agentes inteligentes: programas informáticos de nuevo cuño que van cribando Internet en busca de lo que más nos interesa. Abrumados por toda la información de la "autopista", instruimos a nuestros agentes para que exploren por nosotros: para que se encarguen de clasificar nuestro correo electrónico, de buscar los últimos artículos sobre cirugía articular o ir de tiendas por la Telaraña Mundial (World Wide Web) a la caza de los discos compactos más económicos.

Tanta comodidad encierra, empero, un pequeño inconveniente. Mientras que nosotros o nuestro alter ego electrónico nos afanamos en inspeccionar los puntos de Web, en tales puntos buen número de sus propietarios y anunciantes nos escrutan a nosotros. La Red se está convirtiendo en una tierra prometida para ciertas gentes de negocios, cuyo número pronto desbordará al de aquellos pintorescos Unix-parlantes que en tiempos la dominaron. En un expresivo ejemplo, los jóvenes que inicialmente desarrollaron Yahoo (http://www.yahoo.com) pretendiendo que fuera un índice desenfadado del ciberespacio (organizaban sus lugares favoritos en categorías como "Nuevo" y "Superior") han sido desbordados por negociantes sabedores de que Yahoo no se ganará el pan y la sal por el tono informal de sus listados, sino por los anuncios y la recopilación de datos.



La Telaraña —la Web— está demostrando ser un buen coto de caza para compañías que desean llamar la atención de grupos con intereses sumamente especializados; por ejemplo, consumidores que inician a través de Yahoo su búsqueda de vehículos con propulsión en las cuatro ruedas o de nuevos programas de ordenador. Y con cada pulsación de tecla, los anunciantes y mercaderes sabrán adónde se dirigen los clientes, y en consecuencia, en qué puntos es lógico anunciarse.

No son las visitas a puntos de la Telaraña las únicas estadísticas que los anunciantes recogen de la Red. Reciben también valiosa información de los cuestionarios voluntariamente cubiertos por los usuarios. En tales formularios no sólo se pregunta acerca del propio usuario (nombre, ingresos, direcciones de correo electrónico y domicilio), sino también acerca de lo que le gusta o desagrada del producto e, incluso, cómo responde ante los anuncios del producto. Todas las respuestas van al saco, donde incrementan el valor de la base de datos que la empresa mantiene sobre necesidades y preferencias de los clientes. Para estimular la respuesta, ciertas "páginas de portada" incentivan las informaciones de índole personal.

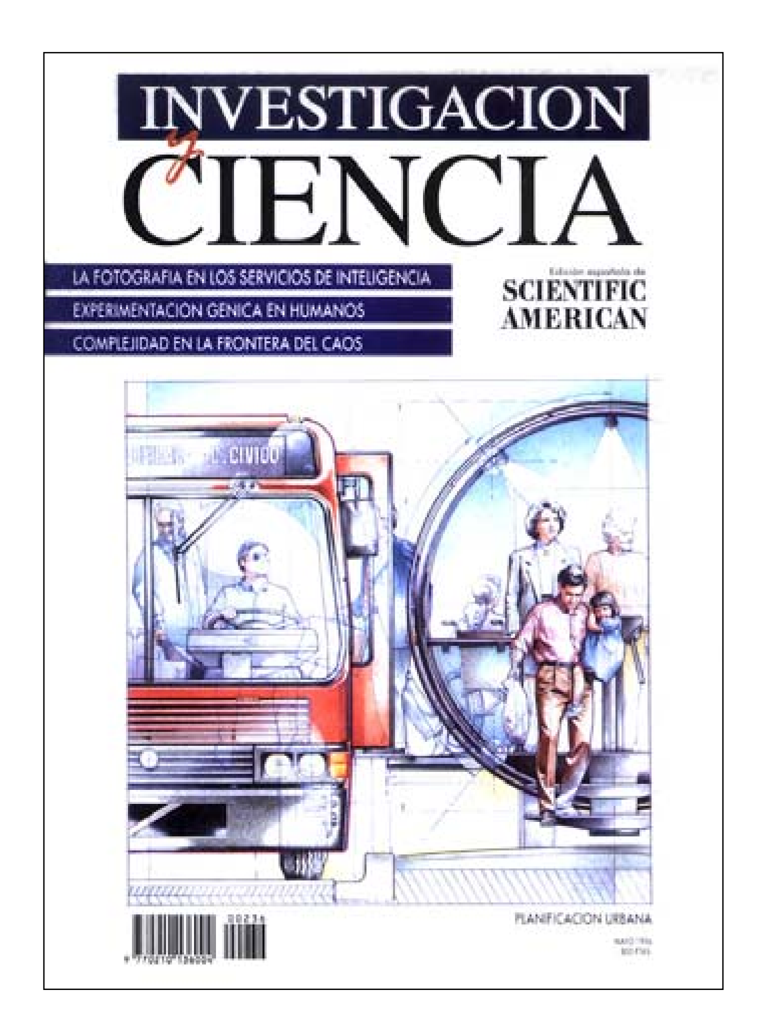
La "minería de datos" (nueva y popular expresión antaño utilizada sobre todo en inteligencia artificial) consiste en la creación de programas que busquen de forma autónoma datos correspondientes, no a individuos, sino a pautas grupales. Por ejemplo, Wal-Mart ha excavado en sus teraoctetos de datos de ventas para dar respuesta más eficiente a los cambios diarios en las preferencias de los consumidores y en los volúmenes de ventas. En otro tiempo, la mayoría de las compañías sólo hacían minería en datos de su propiedad exclusiva; pero al ir adquiriendo los ordenadores potencia y al mejorar los algoritmos de búsqueda, muchas compañías han empezado a comprar datos demográficos y mercadotécnicos que añadir a sus colecciones; a veces, le cambian el envase a lo que tienen y también venden. Inevitablemente, se hará minería en la Internet.

Los economistas opinan que nos encaminamos hacia un "crecimiento exponencial de la intrusión en la intimidad" conforme los ordenadores se vayan haciendo más rápidos, más baratos y más inteligentes. Van a florecer refinadas bases de datos con la finalidad de impedir los fraudes, de poner coto a los gastos sanitarios, o de promover todo tipo de economías, bases a las que se tendrá acceso a través de redes de ordenadores. Tal información podría, en principio, alertar a las compañías de seguros frente a reclamaciones falsas o hacer sonar la alarma de que ha sido robada una tarjeta de crédito al cambiar repentinamente una pauta característica de cargos en cuenta.

Pero una cosa es la minería de datos para hallar regularidades y otra ir en el sentido contrario. Al conectar los rastros con las personas que los dejaron surge una inquietante visión: démosle unos cuantos apellidos y el ordenador nos dirá todo cuanto queramos saber acerca de esas personas. Si tal capacidad nos da que pensar, fijémonos en los informes crediticios que los bancos adquieren rutinariamente cuando sus clientes solicitan una hipoteca. Las carpetas se abultan con los fragmentos y retazos de vidas de las personas: cuánto gastan los solicitantes, en dónde lo gastan, el número de conductores que hay en el hogar familiar y cuántos accidentes han tenido.

Quedan todavía unas pocas almas excéntricas que tratan de defender los deshilachados harapos de anonimato que todavía les quedan. Se niegan a cumplimentar cuestionarios; sólo dan sus números de identificación a su banco y a su corredor de bolsa. Ponen en clave su correo electrónico; eluden la tarjeta de crédito del supermercado que concatena compras con identidades; abonan en efectivo servicios médicos que no quieren que sean conocidos; y esperan con paciencia a que el dinero electrónico se haga realidad. A estos tenaces individualistas se están uniendo impresionantes abogados de la intimidad de cada cual, que tienen fe en las comunicaciones imposibles de rastrear y en la tecnología necesaria para conseguirlas.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LOS ELECTRONES EN PLANILANDIA, por Steven Kivelson, Dung-Hai Lee y Shou-Cheng Zhang

Atrapados en un plano bidimensional, los electrones exhiben el efecto Hall cuántico, sorprendente fenómeno del que ahora se cree que está estrechamente relacionado con la superconductividad.

ARTE Y CIENCIA DEL RECONOCIMIENTO FOTOGRAFICO, por Dino A. Brugioni

En los años cincuenta y sesenta, la interpretación fotográfica ideó ingeniosos métodos para extraer información valiosa de imágenes recónditas. Su trabajo, no pocas veces, afectó profundamente a las relaciones internacionales.

DATOS VITALES, por Tim Beardsley

El Proyecto del Genoma Humano está produciendo abundante información que, una vez elaborada, permitirá conocer los secretos escondidos de las enfermedades. Se trata de un empeño que, a no muy largo plazo, podría transformar la medicina.

GEMACION VESICULAR DE LAS CELULAS, por James E. Rothman y Lelio Orci

Se han desentrañado, por fin, los mecanismos responsables de la formación de esos reservorios sutiles que llamamos vesículas, donde se almacenan las proteínas para su trasiego por la célula.

LA PLANIFICACION URBANA EN CURITIBA, por Jonas Rabinovitch y Josef Leitman

Una ciudad brasileña desafía las medidas tradicionales y busca apoyo en técnicas elementales para mejorar su calidad de vida.

COMPLEJIDAD EN LA FRONTERA DEL CAOS, por Ricard V. Solé, Jordi Bascompte, Jordi Delgado, Bartolo Luque y Susanna C. Manrubia

Los hormigueros, la macroevolución, las selvas tropicales y el cerebro comparten un rasgo común: son sistemas complejos, dotados de propiedades especiales a medio camino entre el orden y el desorden.

MANGLARES DEL CARIBE, por Klaus Rützler e Ilka C. Feller

A pesar de su ubicuidad y de su posición prominente entre tierra y mar, estos ecosistemas tropicales encierran todavía innumerables sorpresas para los investigadores.

EPIDEMIA AFRICANA DE SIDA, por John C. Caldwell y Pat Caldwell

En ciertas regiones del Africa subsahariana casi el 25 por ciento de la población está infectado con el virus de la inmunodeficiencia humana, transmitido por prácticas heterosexuales. ¿Puede la ausencia de circuncisión sensibilizar a los varones de esta región?

